

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

DESENVOLVIMENTO DE UM  
RUGOSÍMETRO A *LASER*

SBI-IFUSP

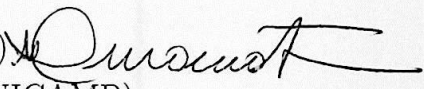


305M810T3762

Dissertação apresentada  
para cumprimento parcial  
das exigências para a  
obtenção do título de  
Mestre em Ciências

*RAUL DIAS PAIVA JR.*

*Banca Examinadora:*

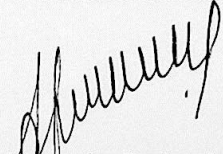
Prof. Dr. Mikiya Muramatsu (Orientador)   
Profa. Dra. Lucila Helena Deliesposte Cescato (UNICAMP)  
Prof. Dr. Oswaldo Horikawa (EPUSP)

INSTITUTO DE FÍSICA

Serviço de Biblioteca e Informação

Tombo: 3762 ex. 1

São Paulo  
Dezembro / 2002

  
Prof. Armando Corbani Ferraz  
Presidente da Comissão de Pós Graduação

def. 11/12/02

P1492

M

ex. 1

### FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação  
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Paiva Junior, Raul Dias

Desenvolvimento de um rugosímetro a laser.  
São Paulo, 2002

Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo  
Instituto de Física. Departamento de Física Geral

Orientador: Prof. Dr. Mikiya Muramatsu  
Área de Concentração: Física

Unitermos: 1. Rugosidade; 2. Caracterização de  
superfícies; 3. Laser-speckle; 4. Teste não destrutivo;  
5. Correlação angular de speckle.

USP/IF/SBI-01/2003



Aos meus pais, que através de suas atitudes, mais que suas palavras,  
ensinaram-me a valorizar o conhecimento;

aos meus irmãos, que desde sempre foram meus companheiros na  
evolução ao longo da vida;

à minha esposa, que dentre tantas outras dádivas fez-me consciente  
de minha vocação;

e sobretudo a meu filho, cuja existência ilumina  
minha alma.

Eu testemunhei a criação de uma obra de arte da natureza.

Esta dissertação, dei a palmadinha para o bebê chorar.

Diogo Soga

UMA TESE É UMA TESE.  
(Mário Prata)

Sabe tese, de faculdade? Aquela que defendem? Com unhas e dentes? É dessa tese que eu estou falando. Você deve conhecer pelo menos uma pessoa que já defendeu uma tese. Ou esteja defendendo. Sim, uma tese é defendida. Ela é feita para ser atacada pela banca, que são aquelas pessoas que gostam de botar banca.

As teses são todas maravilhosas. Em tese. Você acompanha uma pessoa meses, anos, séculos, defendendo uma tese. Palpitantes assuntos. Tem tese que não acaba nunca, que acompanha o elemento para a velhice. Tem até teses pós-morte.

O mais interessante na tese é que, quando nos contam, são maravilhosas, intrigantes. A gente fica curiosa, acompanha o sofrimento do autor, anos a fio. Aí, ele publica, te dá uma cópia e é sempre - sempre - uma decepção. Em tese.

Impossível ler uma tese de cabo a rabo. São chatíssimas. É uma pena que as teses sejam escritas apenas para o julgamento da banca circunspecta, sisuda e compenetrada em si mesma. E nós? Sim, porque os assuntos, já disse, são maravilhosos, cativantes, as pessoas são inteligentíssimas. Temas do arco-da-velha. Mas toda tese fica no rodapé da história. Pra que tanto sic e tanto apud? Sic me lembra o Pasquim e apud não parece candidato do PFL para vereador? Apud Neto.

Escrever uma tese é quase um voto de pobreza que a pessoa se autodecreta. O mundo pára, o dinheiro entra apertado, os filhos são abandonados, o marido que se vire. "Estou acabando a tese". Essa frase significa que a pessoa vai sair do mundo. Não por alguns dias, mas anos. Tem gente que nunca mais volta. E, depois de terminada a tese, tem a revisão da tese, depois tem a defesa da tese. E, depois da defesa, tem a publicação. E, é claro, intelectual que se preze, logo em seguida embarca noutra tese. São os profissionais, em tese.

O pior é quando convidam a gente para assistir a defesa. Meu Deus, que sono. Não em tese, na prática mesmo. Orientados e orientandos (que nomes atuais!) são unânimes em afirmar que toda tese tem de ser - tem de ser! - daquele jeito. É pra não entender, mesmo. Tem de ser formatada assim. Que na Sorbonne é assim, que em Coimbra também. Na Sorbonne, desde 1257. Em Coimbra, mais moderna, desde 1290.

Em tese (e na prática) são 700 anos de muita tese e pouca prática. Acho que, nas teses, tinha de ter uma norma em que, além da tese, o elemento teria de fazer também uma tesão (tese grande). Ou seja, uma versão para nós, pobres teóricos ignorantes que não votamos no Apud Neto.

Ou seja, o elemento (ou a elementa) passa a vida a estudar um assunto que nos interessa e nada. Pra quê? Pra virar mestre, doutor? E daí? Se ele estudou tanto aquilo, acho impossível que ele não queira que a gente saiba a que conclusões chegou. Mas jamais saberemos onde fica o bicho da goiaba quando não é tempo de goiaba. No bolso do Apud Neto?



*Tem gente que vai para os Estados Unidos, para a Europa, para terminar a tese. Vão lá nas fontes. Descobrem maravilhas. E a gente não fica sabendo de nada. São aqueles sisudos da banca. E o cara dá logo um dez com louvor. Louvor para quem? Que exaltação, que encômio é isso?*

*E tem mais: as bolsas para os que defendem as teses são uma pobreza. Tem viagens, compra de livros caros, horas na Internet da vida, separações, pensão para os filhos que a mulher levou embora. É, defender uma tese é mesmo um voto de pobreza, já diria São Francisco de Assis. Em tese.*

*Tenho um casal de amigos que há uns dez anos prepara suas teses. Cada um, uma. Dia desses a filha, de 10 anos, no café da manhã, ameaçou:*

*- Não vou mais estudar! Não vou mais na escola!*

*Os dois pararam - momentaneamente - de pensar nas teses.*

*- O quê, pirou?*

*- Quero estudar mais, não. Olha vocês dois. Não fazem mais nada na vida. É a tese, a tese, a tese. Não pode comprar bicicleta por causa da tese. A gente não pode ir para a praia por causa da tese. Tudo é pra quando acabar a tese. Até trocar o pano do sofá. Se eu estudar vou acabar numa tese. Quero estudar mais, não. Não me deixam nem mexer mais no computador. Vocês acham mesmo que eu vou deletar a tese de vocês? Pensando bem, até que não é uma má idéia!*

*Quando é que alguém vai ter a prática idéia de escrever uma tese sobre a tese? Ou uma outra sobre a vida nos rodapés da história? Acho que seria uma tesão.*

Quando li, ainda no início de meu mestrado, esta bem humorada crítica de Mário Prata ao rebuscamento exagerado da linguagem usada nas teses e dissertações de pós-graduação, literalmente "vesti a carapuça". Acho que ele reclama com razão: temos o hábito de redigir trabalhos de uma maneira que não permite, a alguém que já não conheça muito bem o assunto, o acesso a seu conteúdo.

A preocupação de não incorrer neste erro esteve presente durante toda minha redação. Conto com a compreensão daqueles que achem que fiquei muito longe de conseguir evitá-lo, e também dos outros, que julguem que em busca da simplicidade eu tenha sacrificado a precisão da linguagem ou pecado pela prolixidade.

E, de maneira muito especial, agradeço àqueles que tenham a benevolência de apreciar meu esforço.

# Agradecimentos

Ao Prof. Mikiya Muramatsu pelo constante estímulo, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela orientação, pelo apoio e principalmente pela amizade.

Aos colegas ou ex-colegas do Laboratório de Óptica (Borbely, Edson, Evelin, Gabriel, George, Josmar, Khamis, Luís, Okuyama, Regina, Ricardo, Santos) por fazerem do laboratório um ambiente de trabalho sempre agradável, divertido e estimulante.

Aos amigos Eduardo, Felix, Flávio, Kleiton e Marcos pelas discussões, sugestões, apoio e amizade.

À Profa. Cláudia Maria Coêlho Alves pela confiança e persistência no trabalho, pela agradável companhia e amizade e pelas amostras de restauração com ligas de amálgama de prata.

Aos Profs. Akiyoshi Mizukami, Amilton Sinatora, Mitsuo Takeda e Néstor Gustavo Gaggioli pelas orientações, pelas discussões e pelas valiosas sugestões.

À Profa. María Aurora Rebollo, a partir de cujos estudos nosso trabalho desenvolveu-se, pelo embasamento fornecido e pela disponibilidade em responder a nossas dúvidas.

Ao amigo Diogo Soga, em quem invariavelmente eu pensava cada vez que usava a primeira pessoa do plural ao redigir esta dissertação, pelo auxílio inestimável desde o princípio do trabalho, pela rara amizade e até pelos "puxões de orelha", quando necessários.

Ao grande amigo António Manuel Alves Morais, por não ter jamais permitido que a distância de um oceano fizesse esmaecer nossa amizade ou pudesse impedi-lo de incentivar-me.

Aos Srs. Marcelino Alves e Rubens D. Forcemo pela presteza e boa disposição que caracterizaram seu trabalho sempre que precisei de qualquer coisa na Oficina Mecânica do Departamento de Física Geral.

Às secretárias do Departamento de Física Geral, Dirce Kimie Narimatsu de Almeida e Ivone Vantini, pelo auxílio sempre perfeito prestado.

Ao Sr. Miguel da Silva pela preparação das primeiras amostras utilizadas, com



eletro-erosão e jato de areia.

À **COSIPA** e a **Adriana Saldanha**, pelas amostras de chapas de aço laminadas a frio.

Ao colega **Dácio**, pelas amostras de dentes e pela paciência durante suas medições.

À **D. F. Vasconcellos S. A.**, e em particular a seu diretor **Gilberto Alves Barral**, que realizou minha contratação em regime especial de horário, por ter desta forma viabilizado minha dedicação ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação pela pronta assistência sempre que precisei de qualquer orientação.

A todos os colegas, professores, técnicos e funcionários do IFUSP por sua colaboração, direta ou indireta, para que este trabalho fosse realizado.

## Resumo

Apresentamos o conhecimento acumulado pelo grupo do Laboratório de Óptica a respeito da utilização da Correlação Angular de *Speckle* (CAS) para a medição de rugosidade, técnica baseada na comparação dos padrões de *speckle* produzidos por uma superfície refletora quando iluminada por luz coerente em diversos ângulos de incidência diferentes. Digitalizamos os padrões com uma câmera *CCD* conectada a um microcomputador e os comparamos com um cálculo de correlação realizado por um programa especialmente desenvolvido para este fim. Descrevemos os aperfeiçoamentos que realizamos no equipamento, no procedimento experimental, no tratamento dos dados e na análise dos resultados. Entre as aplicações para as quais a técnica já atraiu interesse citamos: chapas de aço laminadas a frio para a indústria automobilística e superfícies dentais e de materiais utilizados em restaurações e próteses. Comentamos ainda as idéias que temos intenção de implementar para melhorar e agilizar as medições e as perspectivas de aplicações futuras que vislumbramos para o método.

Palavras-chave: rugosidade; caracterização de superfícies; laser-speckle; teste não destrutivo; correlação angular de speckle.



## Abstract

We present the knowledge achieved by the Laboratório de Óptica group about the use of Speckle Pattern Correlation for roughness measuring. It is a technique based on the comparison of the speckle patterns produced by a reflecting surface when lighted by coherent light in different lighting angles. We digitalize the speckle patterns with a CCD camera connected to a microcomputer and we confront them through a correlation calculus carried out by a software specially developed for this purpose. We outline the improvements we made on the equipment, on the experimental procedure, on the data treatment and on the results analysis. Among other, this technique did already catch interest for uses like: cold rolled stripes for automobilistic industry and dental prothesis and dental restoring materials surfaces. We delineate some ideas we intend to apply to improve and quicken the measurements, and some prospects for future uses for the technique.

Key-words: roughness; surface characterization; laser-speckle; non-destructive testing; angular correlation of speckle.

# Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	4
2.1	Classificação dos Parâmetros de Rugosidade	4
2.2	Perfis de Forma, Ondulação e Rugosidade	5
2.3	Parâmetro $R_a$	7
2.4	Parâmetro $R_q$	7
2.5	Relações Entre Parâmetros	8
3	TÉCNICAS PARA MEDIR PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	10
3.1	Comparações Através dos Sentidos	10
3.2	Microscopia	10
3.3	Perfilômetros Mecânicos	11
3.4	Perfilômetros Ópticos	12
3.5	Micro-interferômetros	14
3.6	Rugosímetros baseados no espalhamento da luz	15
3.6.1	Espalhamento Integrado Total	15
3.6.2	Espalhamento por Resolução em Ângulo	16
3.6.3	Contraste do Padrão de <i>Speckle</i>	17
4	<i>SPECKLE</i>	19
4.1	Princípio de Huygens	19
4.2	Difração	20
4.3	Reflexão e Refração	21
4.4	Difusão	23
4.5	Interferência e <i>Speckle</i>	24
4.6	Propriedades do Padrão de <i>Speckle</i>	27
4.6.1	<i>Speckle</i> Estático e <i>Speckle</i> Dinâmico	27
4.6.2	Tamanho dos Grãos	27
4.6.3	Deslocamentos	28
4.6.4	Alterações do Padrão de <i>Speckle</i>	28
4.7	Propriedades Estatísticas	29
4.8	Influência da Polarização	33



<b>5</b>	<b>CORRELAÇÃO ANGULAR DE <i>SPECKLE</i></b>	<b>35</b>
5.1	Medição da Rugosidade . . . . .	35
5.2	Fundamentos Teóricos . . . . .	36
5.2.1	Fundamento Conceitual . . . . .	36
5.2.2	Cálculo da Correlação entre Imagens . . . . .	36
5.2.3	Equação Teórica . . . . .	37
<b>6</b>	<b>MONTAGEM EXPERIMENTAL</b>	<b>48</b>
6.1	Descrição do Arranjo Experimental . . . . .	49
6.1.1	Aperfeiçoamentos do Arranjo . . . . .	51
6.1.2	Câmara <i>CCD</i> . . . . .	53
6.1.3	Programas de Cálculo e de Captura de Imagens . . . . .	53
6.2	Procedimento Experimental . . . . .	54
6.2.1	Alinhamentos Preliminares . . . . .	54
6.2.2	Ajustes e Testes Iniciais . . . . .	56
6.2.3	Tomada de Dados . . . . .	56
6.2.4	Tratamento dos Dados . . . . .	57
6.2.5	Aperfeiçoamentos Feitos . . . . .	58
<b>7</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>61</b>
7.1	Primeiras Medições . . . . .	61
7.2	Testes de repetibilidade . . . . .	65
7.3	Estudo de Modelo de Corrosão . . . . .	66
7.4	Chapas de Aço Laminadas a Frio . . . . .	70
7.5	Superfície Dental . . . . .	73
7.6	Superfícies de Restaurações Dentais . . . . .	75
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>84</b>
8.1	Considerações Gerais . . . . .	84
8.2	Perspectivas Futuras . . . . .	86
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>89</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Em inúmeras aplicações na Ciência e na Tecnologia, torna-se muito importante caracterizar a superfície de materiais utilizados. Um dos aspectos a serem caracterizados consiste de uma descrição da microtopografia da superfície em questão. Buscando realizar este tipo de descrição de uma forma concisa criou-se o conceito de rugosidade superficial, através do qual procura-se indicar se determinada superfície é *lisa* ou *áspera*.

Uma lista exaustiva seria impraticável, mas apenas a título de ilustração podemos citar as seguintes situações nas quais o controle da rugosidade revela-se útil: nas superfícies de peças em atrito, para as quais o estado inicial de rugosidade tem grande influência para o desgaste; nas superfícies de peças cujo atrito mútuo é diminuído através do uso de lubrificantes, para as quais a rugosidade determinará a possibilidade maior ou menor de se alojar lubrificante entre elas; em mecanismos nos quais o atrito é utilizado para movimentar materiais, como em calandras, cilindros laminadores de chapas ou cilindros da indústria gráfica, por exemplo, para os quais é necessária uma rugosidade mínima que permita tração do material a ser arrastado; em materiais que recebem acabamento pintado, para os quais uma rugosidade muito elevada não permitirá correção de irregularidades pela tinta, mas por outro lado uma rugosidade muito pequena prejudicará a adesividade da pintura; no estudo de métodos e materiais empregados em tratamentos dentários, pois a rugosidade da superfície resultante influirá na facilidade de fixação de bactérias, com conseqüências importantes para a saúde bucal.



Para um estudo experimental cuidadoso de qualquer dos processos acima (e de muitos outros não citados) a caracterização das superfícies antes e/ou depois deste é etapa obrigatória, e uma das maneiras mais utilizadas para se fazer tal caracterização é determinar sua rugosidade.

Provavelmente a forma mais completa de descrição da rugosidade de uma superfície seria através de imagens ou gráficos com perspectiva tridimensional que a exibissem em escala que permitissem ver seus detalhes topográficos. Isto pode ser feito, mas existem alguns problemas. Em muitos casos uma imagem pode ser obtida através de um microscópio, mas nem sempre é possível se obter assim uma medida quantitativa do relevo. Técnicas e equipamentos sofisticados de perfilometria óptica e mecânica permitem a elaboração de gráficos representando uma visão tridimensional da superfície acompanhados de informações quantitativas. No entanto, tais equipamentos têm custo geralmente muito elevado e a realização destas medidas costuma ser demorada e dispendiosa. Na hipótese da utilização de um microscópio eletrônico, por exemplo, temos um equipamento de alto preço, uma limitação séria da faixa de rugosidades que pode ser medida, um grande tempo gasto na medição e necessidade de condições especiais para a operação (vácuo, recobrimento etc.).

As indústrias usam geralmente apalpadores mecânicos para obter parâmetros estatísticos, pois existem modelos portáteis, de utilização relativamente simples, que não requerem treinamento extenso de operadores ou instalações complexas, e capazes de fornecer algum valor de maneira razoavelmente rápida. Entretanto, têm limitações: medem o perfil apenas sobre uma linha, podem danificar a peça medida riscando-a, e o perfil obtido é na realidade uma convolução da superfície com o raio do apalpador.

Exigências relativas a produtividade e qualidade vêm tornando estas medidas mecânicas insuficientes, pois os aparelhos mais simples e rápidos são menos precisos, enquanto os mais precisos são complexos e lentos.

Técnicas ópticas baseadas no estudo do espalhamento da luz pela superfície podem vir a

suprir tal lacuna. Permitem a obtenção direta de parâmetros estatísticos (sem necessidade de se apurar o perfil ou o relevo da superfície), abrangem toda a área iluminada, são facilmente automatizáveis, podem ser aplicadas mesmo a superfícies extremamente maleáveis por não implicarem em contato etc. Este trabalho apresenta a técnica óptica conhecida como Correlação Angular de *Speckle* (CAS) que permite a medição da rugosidade de uma superfície sem que haja contato ou danos nela.

Dois parâmetros de utilização muito freqüente no meio industrial são a Rugosidade Média (Ra) e a Rugosidade Quadrática Média (Rq). Este último é o mais utilizado também nos meios acadêmicos. O grupo do Laboratório de Óptica do IFUSP tem estudado desde 1994 a utilização do *speckle* (granulado óptico resultante do espalhamento de luz coerente por superfícies rugosas) para a avaliação destes parâmetros em superfícies gaussianas. Para este caso, pode-se mostrar que existe uma relação de simples proporcionalidade entre as rugosidades expressas pelo Ra e o Rq.

Um dos aspectos que torna importante este trabalho do Laboratório de Óptica é que atualmente não existem no Brasil muitos grupos de pesquisa que utilizem a técnica de CAS, ou mesmo outras técnicas que empreguem o granulado óptico. Outro fato que merece destaque é a possibilidade de uso da técnica nas mais diversas aplicações, o que fica evidenciado pela variedade das amostras usadas (de chapas de aço a materiais dentários). E finalmente devemos mencionar que trata-se do desenvolvimento de um teste não-destrutivo que mediante automatização pode ser muito rápido e preciso.

No capítulo 2 apresentamos os conceitos de parâmetros de rugosidade. No capítulo 3 são apresentadas diversas técnicas para medir os parâmetros de rugosidade. No capítulo 4 apresentamos os conceitos que explicam a formação e as propriedades básicas do *speckle*. No capítulo 5 é apresentada a teoria da Correlação Angular de *Speckle* (CAS). No capítulo 6 é descrita a montagem experimental utilizada, além das práticas utilizadas para realizar as medições. No capítulo 7 são mostrados os resultados experimentais da aplicação da CAS a diversas aplicações. E finalmente no capítulo 8 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as perspectivas futuras.



## Capítulo 2

# PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Existem diversas normas técnicas definindo parâmetros de rugosidade, por exemplo: DIN (alemã), JIS (japonesa) e ISO (internacional). Como é mais comum encontrarmos equipamentos e técnicas que seguem a norma ISO os parâmetros de rugosidade que apresentaremos a seguir serão baseados nas definições desta norma.

Foram desenvolvidas inúmeras maneiras de se obter dados sobre o relevo de uma superfície e de tratá-los para se obter um número (parâmetro de rugosidade) que caracterize sua rugosidade, cada qual podendo mostrar-se mais adequado a um tipo de aplicação específica. Dependendo do caso utiliza-se um ou mais deles no intuito de definir as características que uma superfície deve possuir para atender adequadamente a sua finalidade.

### 2.1 Classificação dos Parâmetros de Rugosidade

Há uma grande variedade de parâmetros de rugosidade, mas é comum os classificá-los em três categorias abrangentes [1]:

- parâmetros de amplitude: são aqueles que levam em consideração as diferenças de altura dos diversos pontos da superfície examinada, como médias de alturas em relação a uma reta média, diferenças máximas de alturas etc.;

- parâmetros de espaçamento: são aqueles que levam em consideração as distâncias entre as irregularidades, em direções paralelas à superfície examinada, como espaçamentos médios entre picos, densidades de picos por unidade de comprimento etc.;
- parâmetros híbridos: são aqueles influenciados tanto pelas alturas como pelos espaçamentos das irregularidades da superfície examinada, como inclinações médias das "facetas" que compõem a superfície, por exemplo.

## 2.2 Perfis de Forma, Ondulação e Rugosidade

Tomando o perfil de uma superfície [2] (vide figura 2.1), que é o resultado de sua intersecção com um plano normal (também chamado de perfil primário), podemos decompô-lo em perfil da forma nominal, perfil de ondulação e perfil de rugosidade.

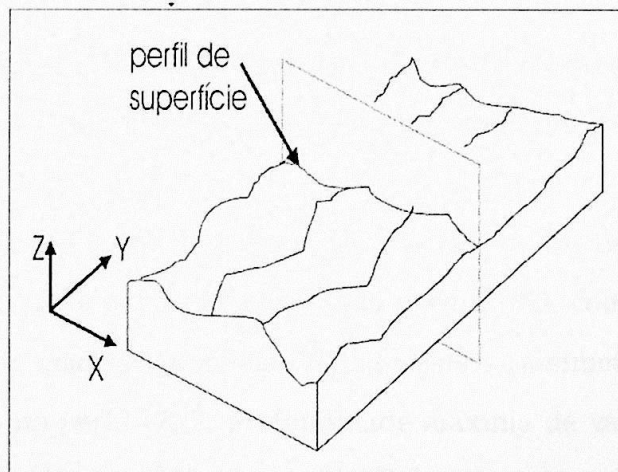


Figura 2.1: Perfil Primário de uma Superfície Rugosa.

Os dois últimos perfis diferem do perfil da forma nominal de superfície por terem frequências espaciais progressivamente maiores. Um critério utilizado para estabelecer as distinções entre os perfis de rugosidade, ondulação e forma é baseado na razão entre a distância e a amplitude das ondas que os descrevem: para perfis de rugosidade tal razão



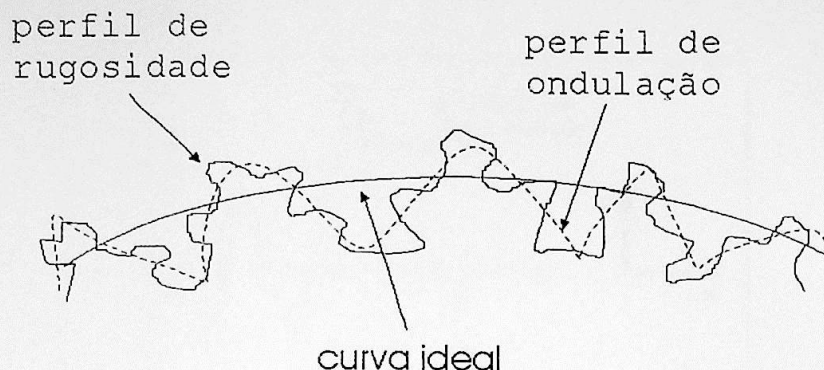


Figura 2.2: Superfície ideal com ondulações e rugosidade.

encontra-se na faixa de 5:1 a 150:1; para perfis de ondulação, na faixa de 100:1 a 1000:1; para perfis de forma a esta razão fica acima das faixas anteriores. Inicialmente obtemos a forma nominal do perfil de superfície, ajustada pelo método dos mínimos quadrados, depois aplicando um filtro  $\lambda_f$  obtemos o perfil de ondulação, e posteriormente aplicando um filtro  $\lambda_c$  obtemos o perfil de rugosidade. Tais filtros são especificados pela norma ISO 11562 [3].

Podemos entender a rugosidade como uma das componentes da irregularidade da superfície [1]. Sobreposta a ela temos outra componente, a ondulação. Ambas são irregularidades da superfície originadas por processos produtivos. Tomando o perfil de uma linha sobre a superfície vemos a ondulação e junto à ela a rugosidade (vide figura 2.2).

Finalmente de posse do perfil de rugosidade são calculados os parâmetros de rugosidade. Existem diversos parâmetros definidos pela norma ISO, como: média aritmética de alturas ( $R_a$ ), rugosidade quadrática média ( $R_q$ ), *skewness* (assimetria) ( $S_k$ ), curtose ( $K_u$ ), altura máxima de pico no perfil ( $R_p$ ), profundidade máxima de vale no perfil ( $R_v$ ), altura máxima do perfil ( $R_z$ ), altura média do perfil ( $R_c$ ) e altura total do perfil ( $R_t$ ). Entretanto dada a grande utilização dos dois primeiros parâmetros na indústria, apenas para eles apresentaremos uma rápida descrição. Também foram os parâmetros que utilizamos sempre que fizemos alguma comparação das medições de rugosidade através desta técnica óptica com outras, pois a maioria dos perfilômetros mecânicos os fornecem. Para defini-los precisamos dizer que em cada ponto do perfil há uma altura correspondente  $z_i$  em relação

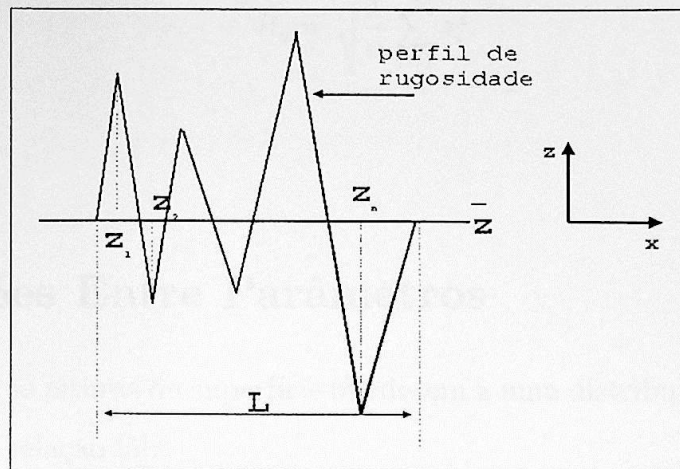


Figura 2.3: Perfil de uma Superfície Rugosa.

a uma linha de referência  $\bar{z}$ , como ilustrado esquematicamente na figura 2.3.

### 2.3 Parâmetro $R_a$

É definido como a média aritmética dos valores absolutos das alturas dentro de um comprimento de amostra ( $L$ ). A rugosidade  $R_a$  é expressa matematicamente como [4]:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (2.1)$$

onde  $L$  é o percurso total medido do perfil e  $z$  é a altura do ponto  $x$ . Na forma discreta temos:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (2.2)$$

onde  $n$  é o número de pontos.

### 2.4 Parâmetro $R_q$

É definido como a raiz quadrática média dos valores das alturas dentro de um comprimento de amostra ( $L$ ). A rugosidade  $R_q$  é dada por [4]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} \quad (2.3)$$



ou na forma discreta:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2}. \quad (2.4)$$

## 2.5 Relações Entre Parâmetros

No caso em que as alturas da superfície obedecem a uma distribuição Gaussiana pode-se mostrar que vale a relação [5]:

$$R_q = 1,25 \times R_a, \quad (2.5)$$

Este, no entanto, é um caso muito particular. De maneira geral, não existem relações simples que permitam a obtenção de um parâmetro de rugosidade a partir de outro. Cada parâmetro tem sua definição matemática, e cada norma estabelece suas próprias condições e procedimentos para sua obtenção. Por isto, mesmo parâmetros com definições matemáticas equivalentes podem resultar diferentes, conforme sejam medidos segundo uma ou outra norma. Nas palavras do Prof. Dr. Âmilton Sinatora (Escola Politécnica da USP), "não se pode falar de rugosidade sem sobrenome", isto é, para que se comunique corretamente uma informação sobre a rugosidade de determinada superfície é preciso dizer, por exemplo: tal superfície tem rugosidade  $R_a = 3\mu m$ , medida conforme tal norma ISO. A mesma idéia está contida nos primeiros parágrafos do capítulo 2 de Whitehouse (1994) [1] e do capítulo 3 de Bennett (1989) [6].

Por este motivo não procuramos no presente trabalho validar as medidas que obtivemos através da Correlação Angular de *Speckle* comparando-as com outras medidas de rugosidade obtidas por métodos diversos. Cada parâmetro de rugosidade tem suas próprias características e comparações entre eles têm, em geral, pouco significado. Podemos, quando muito, esperar certa coerência entre eles na comparação de superfícies "bem comportadas" (que possuam distribuições de alturas pouco tendenciosas). Esclarecendo a expressão

"certa coerência": suponhamos que as amostras A, B e C tenham superfícies "bem comportadas"; se para determinado parâmetro a rugosidade de A é menor que a de B e esta é menor que a de C, então é razoável imaginarmos que a mesma ordenação ocorra se a comparação for feita com base em outro parâmetro.

## Capítulo 3

# TÉCNICAS PARA MEDIR PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

### 3.1. Caracterização de Superfícies Rugosas

### 3.2. Microscopia



## Capítulo 3

# TÉCNICAS PARA MEDIR PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Neste capítulo apresentamos sucintamente as formas de medição e/ou avaliação da rugosidade mais usadas.

### 3.1 Comparações Através dos Sentidos

Existem muitas maneiras de se medir a rugosidade de superfícies. A avaliação mais simples é baseada na comparação da superfície de interesse com padrões, através da visão (auxiliada ou não por lupas), do tato ou de vibrações sentidas por exemplo ao se esfregar a unha em uma e em outra peça. Embora se trate de um recurso impreciso e subjetivo, é muito utilizado no cotidiano devido à sua simplicidade e praticidade, mas não serve para se especificar limites para aceitação ou rejeição de peças, por exemplo.

### 3.2 Microscopia

Uma maneira muito completa de se caracterizar uma superfície consiste em se obter uma imagem sua suficientemente ampliada para que se possa enxergar as irregularidades invisíveis a olho nu. É o que se faz através da microscopia óptica e microscopia eletrônica, recursos muitas vezes imprescindíveis. Mas estes métodos também sofrem de certas limitações. A primeira refere-se à própria visualização que freqüentemente exige imagens em

diversos ângulos de observação distintos para que se possa entender determinados detalhes. Em seguida há o problema do equipamento, que principalmente no caso de necessidade de grandes ampliações pode ser muito caro. Conforme o tipo de observação existe necessidade também de controle do ambiente (temperatura, atmosfera), preparação especial da amostra (por exemplo, metalização para a microscopia eletrônica de varredura) ou de um longo tempo para a tomada de dados (como na microscopia de varredura por tunelamento). Outro problema é o da representatividade: como se trata de imagens em geral muito ampliadas, via de regra pode-se observar apenas uma fração muito pequena da superfície. Nos casos em que ela não é muito homogênea isto pode se constituir em um grave problema. E finalmente, a despeito de serem métodos poderosíssimos de inspeção, a microscopia óptica e eletrônica ainda carecem de facilidades de quantificação das observações.

### 3.3 Perfilômetros Mecânicos

No meio industrial certamente o recurso de medição de rugosidade mais utilizado é o perfilômetro de agulha de diamante.

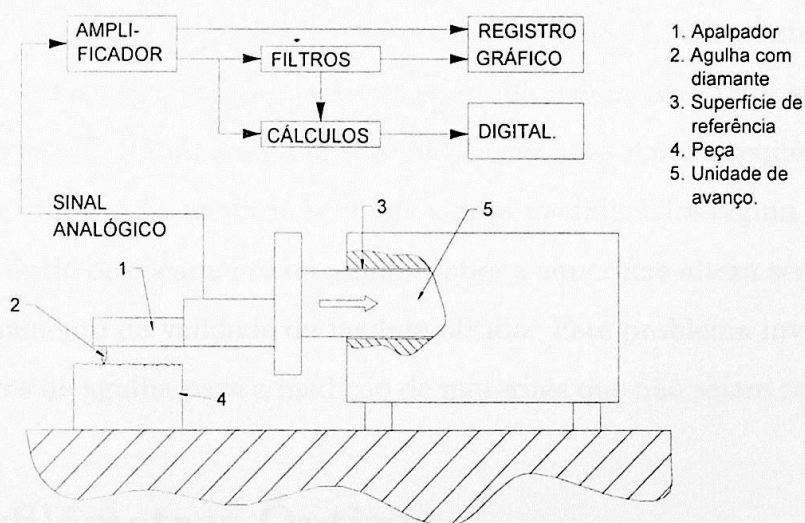


Figura 3.1: Esquema de funcionamento de um perfilômetro mecânico (baseado em ilustração de Saldanha (1997) [7]).



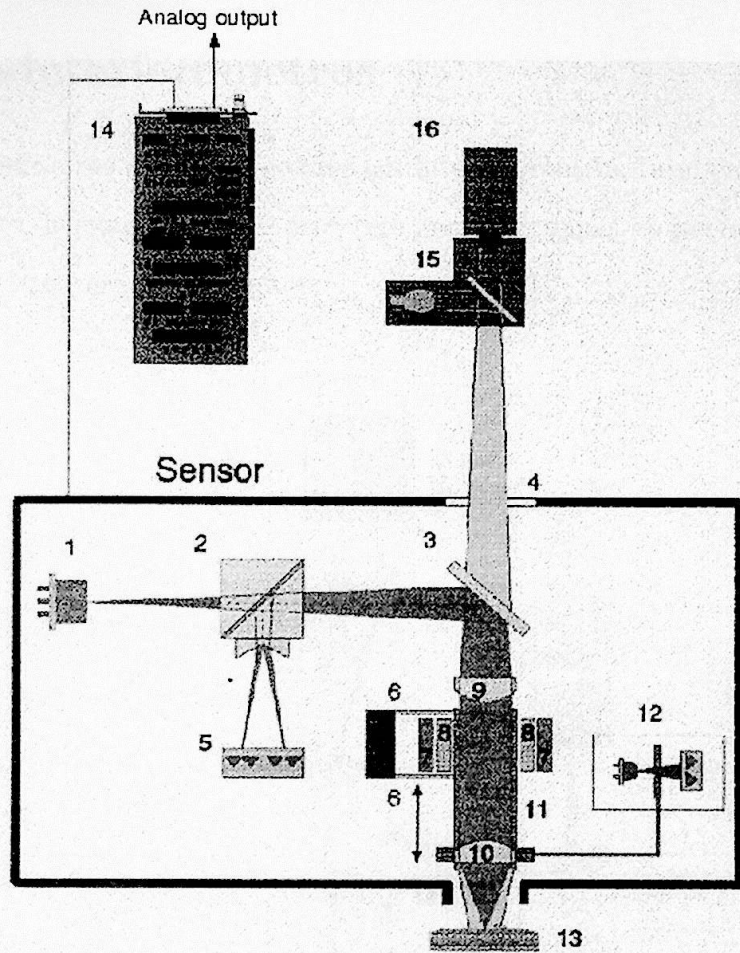
Neste equipamento, disponível no mercado tanto em versões muito simples e econômicas quanto em outras muito sofisticadas e precisas, a superfície a ser medida é percorrida em um movimento horizontal (paralelo à superfície) por uma agulha de diamante sujeita a certa carga, o que faz com que ela suba ou desça acompanhando as saliências e reentrâncias da peça. Os movimentos verticais são convertidos em sinais que adequadamente processados fornecem os parâmetros de rugosidade. Na verdade acreditamos que as definições de praticamente todos os parâmetros de rugosidade estabelecidas em normas tenham sido baseadas em perfis obtidos desta maneira.

Embora sejam muito práticos, os perfilômetros mecânicos também têm seus problemas. Pela sua própria concepção, traçam apenas um perfil correspondente a um corte segundo um determinado plano perpendicular à superfície em cada medição, cabendo portanto uma crítica quanto à representatividade ainda mais severa que aquela apresentada em relação à microscopia: a medição da rugosidade fornecida por eles usa uma amostragem bidimensional (alturas apuradas ao longo de determinado comprimento) para caracterizar uma microtopografia que é, a rigor, tridimensional. Além disto, para que a agulha seja capaz de acompanhar irregularidades muito pequenas, ela precisa ser extremamente aguda (ainda assim, há sempre a possibilidade de existirem fissuras nas quais ela não possa penetrar), mas isto a torna muito frágil, de modo que é necessário encontrar um ponto intermediário que otimize a precisão e a viabilidade da medição simultaneamente. Para se evitar ao máximo o desgaste é utilizado o diamante em sua fabricação, mas em consequência torna-se quase impossível realizar-se uma medição sem que a peça medida sofra algum risco. Ora, isto significa que o próprio deslocamento da agulha sobre a superfície altera seu perfil, conduzindo a um questionamento da validade da medida obtida. Este problema inviabiliza a utilização de perfilômetros de agulha para a medição de materiais que não sejam razoavelmente duros.

### 3.4 Perfilômetros Ópticos

Existem perfilômetros de concepção semelhante aos mecânicos de agulha, mas nos quais ao invés da ponta de diamante utiliza-se uma "sonda" óptica. Isto resolve o problema de se riscar a superfície e a limitação quanto à dureza do material medido, embora persista a

questão da representatividade.



- 1 Laser-diode, 2 Prism with splitting mirror, 3 Splitting mirror, 4 Window,
- 5 Photo-diodes, 6 Lamellar springs, 7 Coil, 8 Magnet, 9 Collimator lens,
- 10 Objective lens, 11 Tube, 12 Light barrier measuring system, 13 Test object, 14 PC-card, 15 Microscope with illumination, 16 CCD-camera

Figure 3: UBM Microfocus-measuring system (schematic view)

Figura 3.2: Esquema de funcionamento de um perfilômetro óptico ( extraído de <http://www.ipp.mpg.de/de/for/bereiche/diagnostik/uhv/>).

Neles, uma objetiva de grande abertura (conseqüentemente, com pequena profundidade de foco) é utilizada para a observação da superfície. O "ponto" observado é deslocado ao longo de uma linha, como a agulha de um perfilômetro mecânico. Em cada nova posição o microscópio é focalizado para que a imagem permaneça em foco, e os deslocamentos



verticais de focalização são registrados, fornecendo ao final do deslocamento o perfil da superfície ao longo da linha percorrida.

### 3.5 Micro-interferômetros

Há outros rugosímetros ópticos baseados em interferometria, também isentos de contato com a peça, capazes de examinar uma área (em geral pequena) ao invés de uma linha, mas que costumam ser bastante dispendiosos.

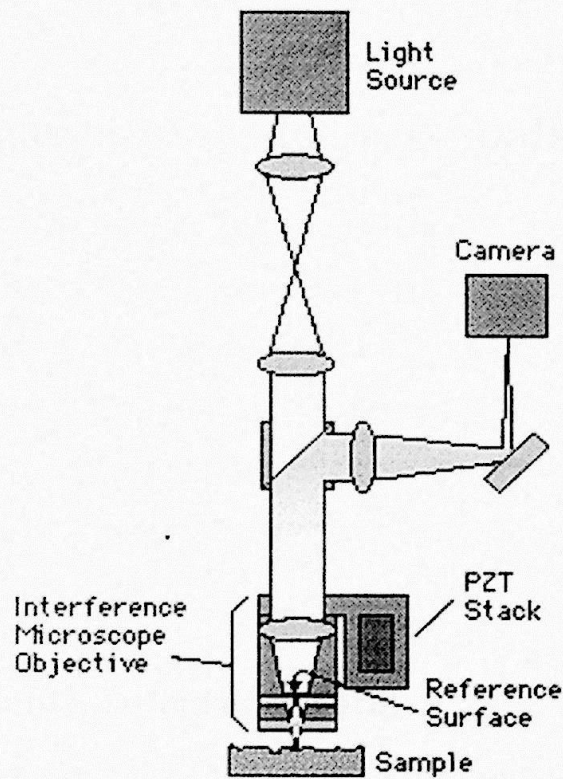


Figura 3.3: Esquema de funcionamento de um micro-interferômetro (extraído da página [www.zygo.com](http://www.zygo.com)).

Nestes aparelhos um interferômetro é montado de maneira acoplada a um microscópio. O interferômetro divide o feixe de iluminação do microscópio em duas partes: uma incide sobre a amostra e outra sobre a superfície de referência do interferômetro. A luz que

retorna da amostra combina-se com a luz refletida pela superfície de referência e os dois feixes são colimados ao atravessarem a objetiva. Como a superfície de referência é colocada em posição perpendicular à luz incidente, o feixe colimado após a reflexão sobre ela tem frentes de onda perpendiculares ao eixo óptico do microscópio. Já a luz que retorna da amostra forma frentes de onda cuja inclinação depende da inclinação da parte da superfície rugosa onde se refletiu. Estas frentes de onda inclinadas ao interferirem com as frentes de onda provenientes da superfície de referência produzem franjas de interferência. Franjas adjacentes indicam diferenças de altura de meio comprimento de onda entre as regiões da amostra onde se apresentam. Assim, a partir da análise das franjas (veja, por exemplo, Soga (2000) [8]) pode-se obter um mapa de alturas da região imageada.

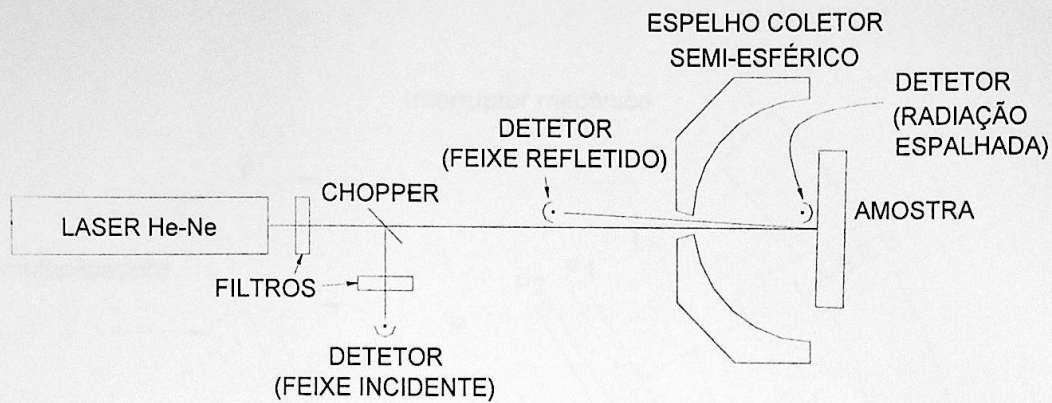
### 3.6 Rugosímetros baseados no espalhamento da luz

Existem também os rugosímetros ópticos baseados no espalhamento da luz [6], entre os quais podemos incluir o método de Correlação Angular de *Speckle* (CAS), o qual discutiremos com mais detalhe no capítulo 5. Apresentaremos brevemente a seguir três destes rugosímetros. Eles baseiam-se na idéia de que uma superfície perfeitamente plana produz apenas reflexão especular da luz que incide sobre ela, mas fora desta condição parte da luz é difundida devido às irregularidades da superfície.

#### 3.6.1 Espalhamento Integrado Total

Uma das técnicas de avaliação da rugosidade por espalhamento da luz chama-se Espalhamento Integrado Total (*Total Integrated Scattering* ou *TIS*). O equipamento consiste de uma fonte de luz (usualmente um *laser* de HeNe), filtros para controle da intensidade da luz, um filtro espacial ou outro meio equivalente para controle do tamanho do feixe, um sistema para coleta da luz espalhada (recomenda-se o uso de uma semi-esfera com polimento óptico e aluminizada), detectores para medir a luz refletida e espalhada e equipamento para a aquisição e o processamento dos dados.





$$TIS = \frac{V_{\text{AMOSTRA, ESPALHADA}}}{V_{\text{AMOSTRA, REFLETIDA}}} = (4\pi\delta_{\text{rms}}/\lambda)^2$$

$$\delta_{\text{rms}} \text{ (RUGOSIDADE EFETIVA rms)} = (\lambda/4\pi)(TIS)^{1/2}$$

Figura 3.4: Esquema de funcionamento de um instrumento de medição de TIS (baseado em ilustração de Bennett & Mattson (1989) [6]).

A amostra e o detector para a luz espalhada são colocados no interior da semi-esfera. Esta possui uma pequena abertura que permite a entrada do feixe luminoso e a saída do feixe refletido (com pequena inclinação) que incidirá sobre o detector para a luz refletida. O ponto iluminado da amostra e o detector no interior da esfera ficam posicionados de tal maneira que a luz espalhada pelo primeiro seja focalizada sobre o segundo. A partir da razão entre a luz espalhada e a luz total (espalhada mais refletida pela amostra) obtém-se a rugosidade.

### 3.6.2 Espalhamento por Resolução em Ângulo

Uma técnica similar à de Espalhamento Integrado Total é a de Espalhamento por Resolução em Ângulo [9] (*Angle-Resolved Scattering* ou *ARS*). Ela também usa uma fonte de luz cujo feixe é controlado através de polarizadores e incide sobre a amostra. Neste caso, no entanto, a luz espalhada não é coletada. Sua intensidade é medida sob cada ângulo de espalhamento através de um detector que desloca-se ao redor da amostra.

A partir da distribuição angular de intensidades podem ser obtidos vários parâmetros

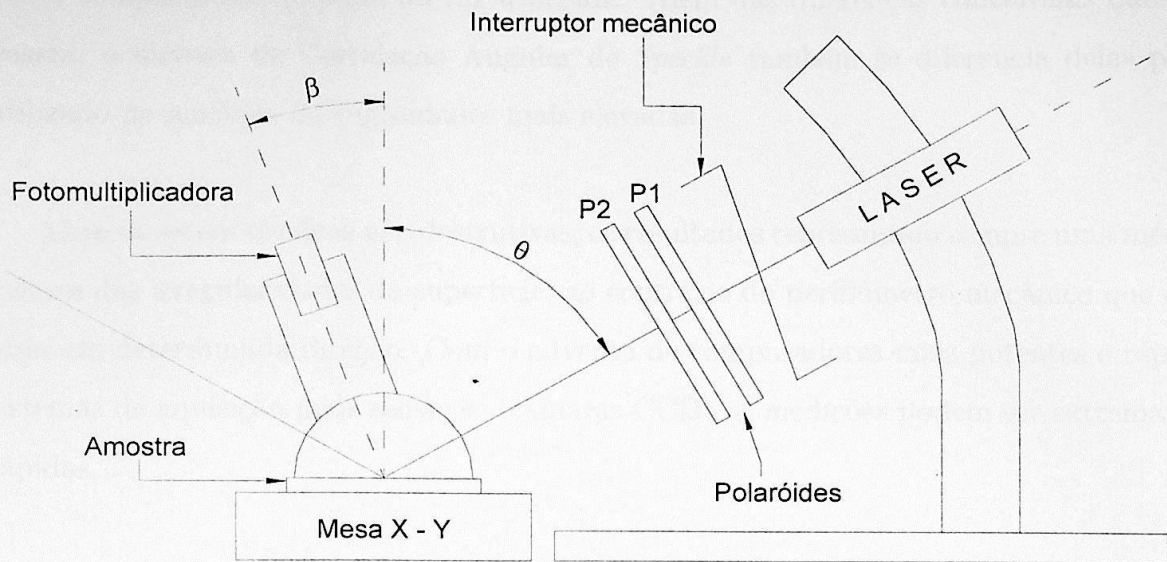


Figura 3.5: Esquema de funcionamento de um instrumento de medição de rugosidade por ARS (baseado em ilustração de Souza (1997) [9]).

estatísticos relacionados à rugosidade da superfície.

### 3.6.3 Contraste do Padrão de *Speckle*

Quando uma superfície rugosa é iluminada por luz coerente esta é espalhada e forma um conjunto de regiões claras e escuras, conhecido como padrão de *speckle* (vide capítulo 4, adiante). Se a superfície tem rugosidade muito pequena (com irregularidades da ordem de  $\lambda/40$ ), o padrão de *speckle* não fica bem desenvolvido, apresentando baixo contraste. Por outro lado, a partir de determinada rugosidade (com irregularidades da ordem de  $\lambda/4$ ) e com condições adequadas de observação, o padrão de *speckle* atinge contraste unitário. Estes fatos inspiram a utilização do contraste do padrão de *speckle* para a avaliação da rugosidade da superfície espalhadora (com irregularidades na faixa citada), através da assim chamada técnica de medição de rugosidade por Contraste do Padrão de *Speckle*.

As técnicas apresentadas acima têm em comum o fato de serem adequadas para a me-



dição de rugosidades bastante baixas, de peças cujas irregularidades sejam bem menores que o comprimento de onda da luz utilizada. Além das diferenças conceituais que o embasam, o método de Correlação Angular de *Speckle* também se diferencia delas por ser utilizado na medição de rugosidades mais elevadas.

Além de serem técnicas não destrutivas, os resultados representam sempre uma média dos valores das irregularidades da superfície, ao contrário do perfilômetro mecânico que dá valores em determinada direção. Com o advento de computadores mais potentes e rápidos e sistemas de aquisição mais sensíveis (câmaras CCD) as medições podem ser extremamente rápidas.

# Capítulo 4

## *SPECKLE*

### 4.1 Princípio de Huygens

Para a compreensão do fenômeno da formação do *speckle* é importante a noção de difração da luz. No entendimento da difração é útil pensar na propagação da luz em termos do princípio de Huygens, segundo o qual cada ponto de uma frente de onda comporta-se como emissor de uma ondícula secundária.



Figura 4.1: Cada ponto da frente de onda emite uma ondícula secundária.

De acordo com esta descrição, a envoltória das ondículas emanadas simultaneamente pelos inúmeros pontos que formam a frente de onda dá origem a uma nova frente de onda adiante, resultando no avanço da frente de onda original como um todo.





Figura 4.2: As ondículas secundárias formam uma frente de onda adiantada, que emite por sua vez outras ondículas secundárias.

## 4.2 Difração

Quando o meio onde a luz se propaga é homogêneo, tal onda resultante da composição de ondículas secundárias é paralela à onda original. No entanto, se há alguma inhomogeneidade, as ondículas provenientes de alguns dos pontos podem ficar atrasadas ou adiantadas em relação às demais ou podem ainda ser bloqueadas.

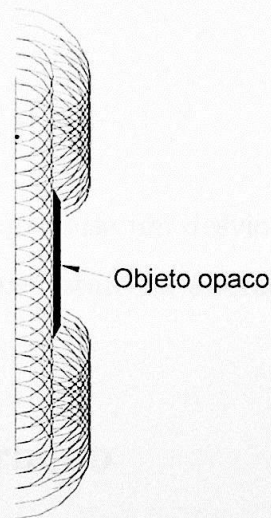


Figura 4.3: Parte das ondículas pode ser, por exemplo, bloqueada por um objeto.

Para uma melhor descrição do que acontece neste caso devemos levar em conta a interferência entre as ondículas, conforme imaginou Fresnel ao completar o princípio de Huygens e compor o princípio de Huygens-Fresnel. Isto significa que para conhecer os vetores de campo elétrico e de campo magnético (que formam as ondas luminosas) em um determinado ponto do espaço num certo instante, é necessário somar (vetorialmente) os vetores de campo elétrico e de campo magnético de todas as ondículas que ali chegam em tal instante. Fazendo isto, a composição das ondículas não mais resultará numa linha paralela à onda original e a onda resultante apresentará alguma alteração em sua curvatura. Esta alteração da curvatura da frente de onda (que pode ser entendida em uma descrição alternativa como um desvio dos raios luminosos) é chamada de difração da luz.

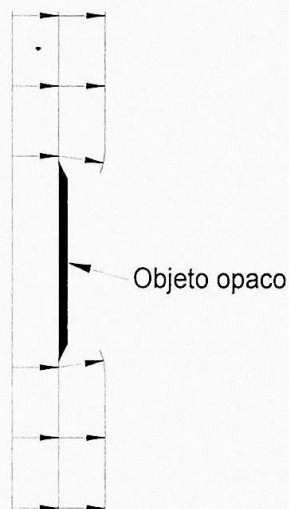


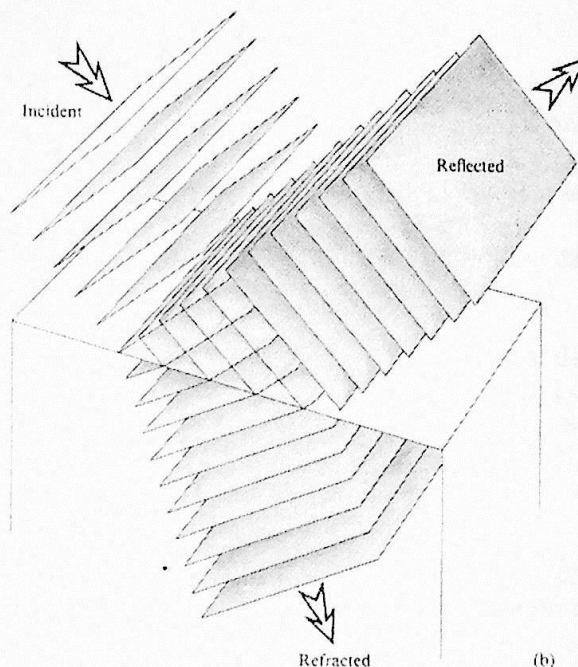
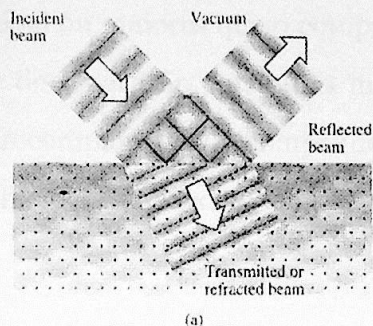
Figura 4.4: O fenômeno de difração causa um desvio dos raios luminosos, que são perpendiculares às frentes de onda cuja curvatura foi alterada.

### 4.3 Reflexão e Refração

Quando a luz que está se propagando por determinado meio atinge uma superfície que o separa de outro meio (esta superfície é chamada de dióptro), parte dela retorna para o primeiro meio (parte da luz é refletida ou difundida pelo dióptro) e outra parte passa a



propagar-se através do segundo meio (outra parte da luz é refratada).



**FIGURE 4.13** A beam of plane waves incident on a distribution of molecules constituting a piece of clear glass or plastic. Part of the incident light is reflected and part refracted.

Figura 4.5: Um feixe de ondas planas incidente sobre uma distribuição de moléculas constituindo um pedaço de vidro ou plástico transparente. Parte da luz incidente é refletida e parte refratada [10].

Além disto, conforme as propriedades de interação de cada um destes meios com a luz, uma parcela maior ou menor dela é absorvida durante a propagação. Enquanto a absorção depende somente do comprimento de onda da luz que se propaga e das características dos meios, a difusão, a reflexão e a refração sofrem influências tanto dos meios como do diopetro existente entre eles.

Chamaremos de rugosa uma superfície de separação entre meios que apresente irregularidades de dimensão comparável ou maiores que o comprimento de onda da luz que incide sobre ela. Quando a superfície de separação entre dois meios é lisa, ou seja, possui apenas irregularidades muito pequenas comparadas ao comprimento de onda da luz, as frentes de onda luminosas que sobre ela incidem obedecem simplesmente às clássicas leis de refração e reflexão.

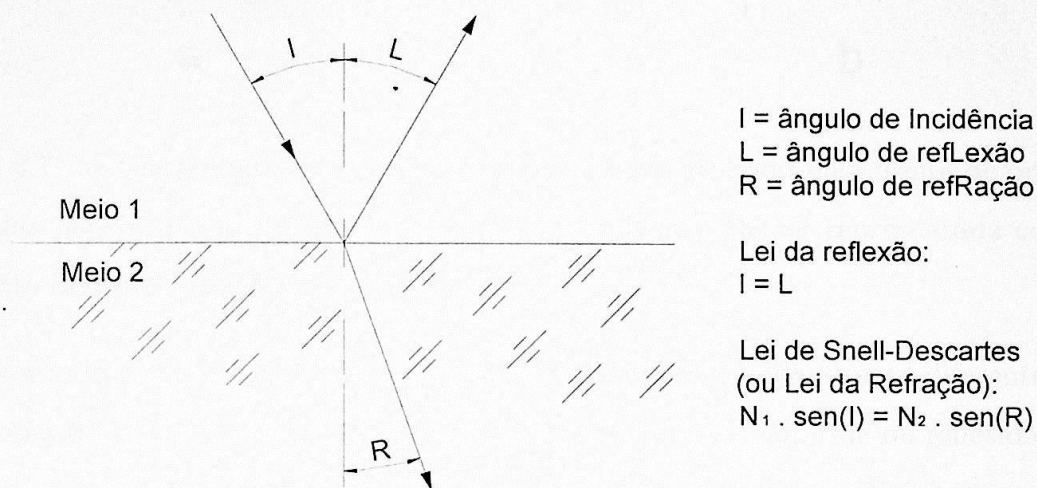


Figura 4.6: Ao incidir em um dióptro plano, um raio luminoso obedece às leis de reflexão e refração.

## 4.4 Difusão

No caso de uma superfície de separação rugosa, no entanto, a situação é mais complexa. Os pontos que a formam têm alturas variadas em relação a um plano ideal médio que pudesse ser considerado aproximação da superfície rugosa em questão. Então eles são alcançados pela frente de onda incidente em instantes distintos e conseqüentemente emitem suas ondículas secundárias em momentos diferentes.



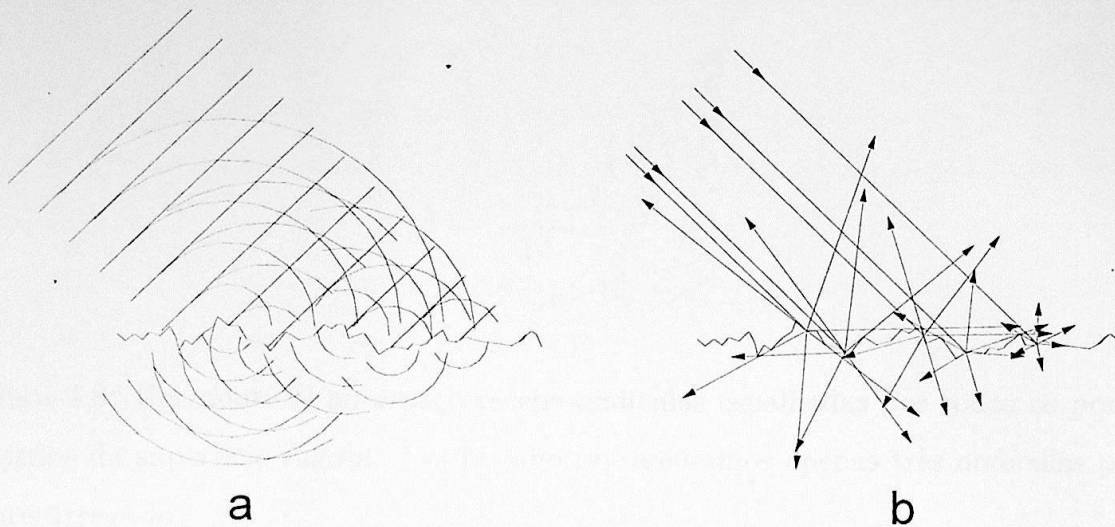


Figura 4.7: a) Cada ponto da superfície rugosa, ao ser atingido pela frente de onda, emite ondículas para todas as direções; b) a difusão também pode ser representada como espalhamento de raios luminosos.

Deste modo tem-se uma infinidade de ondículas partindo de alturas diferentes em instantes distintos, e não se obtém mais uma frente de onda transmitida ou refletida e sim luz espalhada em todas as direções, pois em cada um dos pontos da superfície rugosa a luz sofre difração. Este é o fenômeno chamado de difusão da luz, que observamos cotidianamente ao olharmos para os objetos à nossa volta.

## 4.5 Interferência e *Speckle*

Se a superfície rugosa for iluminada com luz coerente, as ondículas defasadas ("desencontradas" umas das outras) que se espalharem pelo espaço manterão ainda a coerência da luz que as gerou. Uma vez que luz coerente propicia a ocorrência do fenômeno de interferência, tais ondículas, ao se encontrarem, interferirão umas com as outras. Tomemos um determinado ponto P (genérico) do espaço para análise. A ele estarão chegando ondículas de todos os pontos iluminados da superfície que sejam visíveis a partir de P.

Se acontecer de a maioria destas ondículas compor interferências construtivas (ou seja,

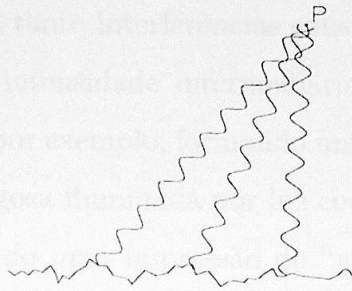


Figura 4.8: Um ponto  $P$  no espaço recebe ondículas espalhadas por todos os pontos iluminados da superfície rugosa. No desenho representamos apenas três ondículas para não sobrecarregá-lo.

caso seus vetores campo elétrico e magnético em  $P$  num certo instante "apontem" aproximadamente no mesmo sentido),  $P$  estará bastante iluminado. Por outro lado, se acontecer de a maioria das ondículas compor interferências destrutivas (ou seja, caso seus vetores campo elétrico e magnético em  $P$  num certo instante "apontem" aproximadamente em sentidos opostos),  $P$  ficará mal iluminado.

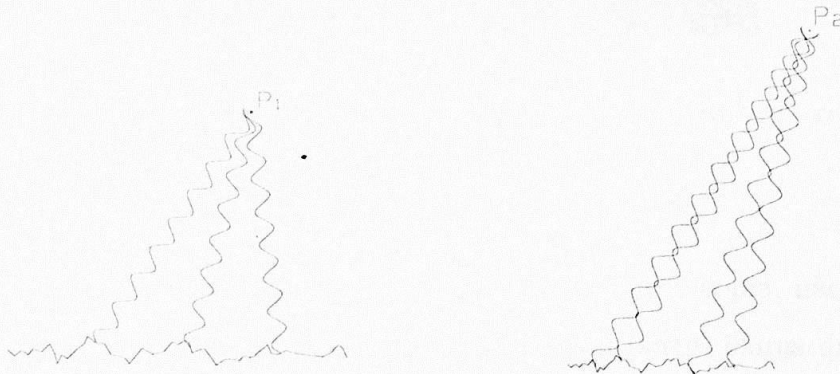


Figura 4.9: As ondículas representadas que são espalhadas pela superfície e chegam a um ponto  $P_1$  no espaço estão aproximadamente na mesma fase, produzindo interferência construtiva; se o mesmo acontecer com a maioria das outras ondículas que chega a  $P_1$ , ele será um ponto claro. Cada ondícula representada que é espalhada pela superfície e chega a um ponto  $P_2$  no espaço, tem outra ondícula correspondente defasada de aproximadamente  $\pi$ , produzindo interferência destrutiva. Se o mesmo acontecer com a maioria das outras ondículas que chega a  $P_2$ , ele será um ponto escuro.



Ambas as situações são possíveis, e de fato ocorrem, além de haver também pontos nos quais as ondículas compõem tanto interferências construtivas quanto destrutivas e que resultam iluminados com uma intensidade intermediária. Assim, quando se toma uma infinidade de pontos do espaço (por exemplo, formando um plano) que são atingidos pela luz difundida por uma superfície rugosa iluminada por luz coerente, obtém-se uma alternância de "claros" e "escuros", causando uma impressão de "granulosidade". Este fenômeno é chamado de "granulado óptico", e mais conhecido pelo seu nome em inglês, "speckle", que significa salpicado, cheio de manchas ou nódoas etc.



Figura 4.10: Imagem do padrão de *speckle* produzida por uma amostra rugosa e registrada com uma câmera *CCD*.

Julgamos oportuno salientar que, diferentemente da microscopia, não se trata de uma imagem da superfície. É comum um leigo indagar se as partes claras da imagem correspondem às reentrâncias ou às saliências da superfície, indagação que na verdade não faz o menor sentido, dado que todos os pontos da figura de *speckle*, sejam eles claros ou escuros, recebem luz de quase toda a superfície iluminada. Assim, o *speckle* traz informações médias da superfície, não se prestando, por exemplo, para a localização ou para a determinação das dimensões de uma imperfeição existente em algum ponto particular sobre ela.

## 4.6 Propriedades do Padrão de *Speckle*

A figura de "claros" e "escuros" formada pelo *speckle* numa determinada situação é chamada de padrão de *speckle*. O padrão de *speckle* pode ser alterado por vários fatores. As interferências dependem da defasagem entre as ondículas provenientes da superfície rugosa. Tal defasagem é função do comprimento de onda utilizado para iluminar a superfície e da diferença de caminho óptico percorrido pela onda incidente até atingir os diversos pontos da superfície rugosa, somada à diferença de caminho óptico percorrida pelas ondículas desde tais pontos até o ponto de observação. Estas diferenças de caminho óptico são determinadas então pela topografia da região da superfície que está sendo iluminada, pelo ângulo de incidência da iluminação, pela posição do ponto de observação, e pelos índices de refração das regiões atravessadas pelas ondas luminosas.

### 4.6.1 *Speckle* Estático e *Speckle* Dinâmico

Quando se tem todas as condições mencionadas acima constantes o padrão de *speckle* não se altera ao longo do tempo e se obtém o que se chama de padrão de *speckle* estático. A superfície iluminada, no entanto, pode não ser estática, como a superfície de um tecido biológico ou quando ocorrem reações químicas, por exemplo. Nestes casos, mesmo mantidas constantes as demais condições o *speckle* apresentará variações ao longo do tempo, tratando-se do que é chamado de *speckle* dinâmico. O *speckle* dinâmico tem uma série de aplicações, das quais se pode ver alguns exemplos em Silva (2000) [4]. Neste trabalho, tratamos apenas de superfícies inertes, produzindo sempre padrões de *speckle* estático.

### 4.6.2 Tamanho dos Grãos

Um padrão de *speckle* estático gerado pela luz coerente espalhada por uma superfície rugosa tem o tamanho médio de seus grãos dado pela equação [11]:

$$d \approx 1.2\lambda L/D \quad (4.1)$$

onde  $d$  é o diâmetro médio dos grãos no padrão de *speckle*,  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz utilizada,  $L$  é a distância da superfície rugosa ao anteparo onde se observa a figura de



*speckle* e  $D$  é o diâmetro da superfície rugosa iluminado pelo feixe de luz coerente.

Deste modo, para uma dada geometria para obtenção de um padrão de *speckle* os grãos serão tanto menores quanto maior for a área iluminada. Por outro lado, serão tanto maiores quanto maior for a distância entre a região iluminada e a posição de observação do padrão. Observe-se que a expressão não inclui qualquer referência à rugosidade da superfície espalhadora. Isto mostra que, de maneira contrária à intuição de muitas pessoas, uma superfície mais ou menos rugosa não produz um padrão de *speckle* com grãos maiores ou menores.

Existe uma estreita proximidade entre os fenômenos de formação do padrão de *speckle* e a difração em uma rede. Quando temos uma superfície (ou um meio, em se tratando de difração por transmissão) com variações periódicas e organizadas obtemos os padrões de difração tradicionais, que também apresentam periodicidades. Podemos pensar em uma superfície espalhadora rugosa como uma grade de difração aleatória. Conseqüentemente, quando iluminada, esta grade aleatória gera uma figura de difração na qual as regiões claras e escuras também distribuem-se aleatoriamente, formando o padrão de *speckle*. A eq. 4.1 está em perfeito acordo com esta interpretação, pois representa o raio do disco de Airy gerado pelo círculo formado pela iluminação.

### 4.6.3 Deslocamentos

Um padrão de *speckle* estático está intimamente ligado à superfície rugosa que espalha a luz que irá formá-lo. Assim, se tal superfície sofrer pequenos deslocamentos o *speckle* correspondente também se deslocará, o que permite que seja utilizado para monitorar deslocamentos e deformações. Exemplos de tais aplicações podem ser encontrados em Melão (1991) [12] e em Roccatto & Muramatsu (1998) [13].

### 4.6.4 Alterações do Padrão de *Speckle*

Quando se tem um padrão de *speckle* estático (gerado por uma superfície imóvel) pode-se alterá-lo através da mudança de algum parâmetro que influa sobre a diferença de fase

entre as ondículas que interferem para criá-lo. Dentre tais parâmetros há o comprimento de onda utilizado e o índice de refração dos meios atravessados pelas ondas luminosas e exemplos de aplicação de tais variações para a medição da rugosidade de superfícies podem ser encontrados em Muramatsu (2001) [14].

Uma outra alternativa, aquela explorada no desenvolvimento do presente trabalho, é provocar alterações do padrão de *speckle* através da mudança do ângulo de incidência da iluminação sobre a amostra. Antes de discutir em detalhe a técnica utilizada vamos enumerar as principais propriedades estatísticas do padrão de *speckle*.

## 4.7 Propriedades Estatísticas

Neste item faremos um resumo das principais propriedades estatísticas de primeira e de segunda ordem para o padrão de *speckle*, segundo a abordagem apresentada por Goodman (1984) [15], dando ênfase à estatística de primeira ordem.

Se ondas luminosas perfeitamente monocromáticas e polarizadas são espalhadas por um meio não homogêneo, a amplitude do campo elétrico em determinada posição do espaço e em dado instante será dada por

$$u(x, y, z, ; t) = A(x, y, z) \exp[i2\pi\nu t] \quad (4.2)$$

onde  $A$  representa o fasor amplitude do campo, uma função complexa do espaço,

$$A(x, y, z) = |A(x, y, z)| \exp[i\theta(x, y, z)]. \quad (4.3)$$

Este fasor de amplitude resulta da soma de muitos fasores elementares correspondentes às ondículas espalhadas pelo meio não homogêneo. Assim o problema de conhecer a estatística do fasor de amplitude é idêntico ao clássico problema do "passeio aleatório" (*random walk*) pelo plano. Para estudar as propriedades estatísticas do campo complexo resultante assumiremos que tais fasores elementares satisfazem às seguintes hipóteses:



- (i) a amplitude  $a_k/\sqrt{N}$  e a fase  $\theta_k$  do  $k$ -ésimo fasor elementar são estatisticamente independentes uma da outra e das amplitudes e fases dos demais fasores elementares (isto é, as áreas espalhadoras elementares não são relacionadas e o módulo de determinada componente espalhada não tem relação com sua fase);
- (ii) as fases  $\theta_k$  são uniformemente distribuídas no intervalo primário  $(-\pi, \pi)$  (isto é, a superfície é rugosa se comparada ao comprimento de onda, resultando daí que percursos de fase de várias vezes  $2\pi$  radianos produzem uma distribuição uniforme no intervalo primário).

Com base nestas propriedades pode-se mostrar que as partes real e imaginária do campo complexo têm médias nulas, variâncias iguais e não são correlacionadas.

Supondo ainda, como geralmente é o caso na prática, que o número de fasores elementares que contribuem é extremamente grande, e usando o Teorema Central do Limite, conclui-se que as partes real e imaginária do fasor de amplitude obedecem à função densidade de probabilidade

$$p_{r,i}(A^{(r)}, A^{(i)}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{[A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4.4)$$

onde

$$\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\langle |a_k|^2 \rangle}{2}. \quad (4.5)$$

Funções densidade de probabilidade deste tipo são chamadas de Gaussianas circulares, dado que suas curvas de nível (contornos formados por todos os pontos da função que têm a mesma probabilidade) são círculos no plano complexo.

Durante a realização de experimentos na região óptica do espectro usualmente é a intensidade da luz que é medida, e não a amplitude do campo. Por isso interessa-nos conhecer as propriedades estatísticas da primeira, mais que da segunda. A partir das

transformações que relacionam a intensidade  $I$  e sua fase  $\theta$  com as partes real e imaginária da amplitude complexa

$$I = [A^{(r)}]^2 + [A^{(i)}]^2 \quad (4.6)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{A^{(i)}}{A^{(r)}}\right) \quad (4.7)$$

é possível aplicar a técnica usual de transformação de variáveis aleatórias à expressão 4.4 e chegar a

$$p_{I,\theta}(I, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) & \text{se } I \geq 0 \text{ e } -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{em outros casos.} \end{cases} \quad (4.8)$$

A função densidade de probabilidade marginal apenas da intensidade é obtida por

$$p_I(I) = \int_{-\pi}^{\pi} p_{I,\theta}(I, \theta) d\theta = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) & \text{se } I \geq 0 \\ 0 & \text{em outros casos.} \end{cases} \quad (4.9)$$

De maneira similar, a função densidade de probabilidade da fase é obtida por

$$p_\theta(\theta) = \int_0^\infty p_{I,\theta}(I, \theta) dI = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{se } -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{em outros casos.} \end{cases} \quad (4.10)$$

Assim concluímos que a intensidade em um ponto  $P$  de um padrão de *speckle* polarizado obedece a uma função densidade de probabilidade *exponencial negativa* (o que significa que para um ponto tomado aleatoriamente na figura de *speckle* o valor mais provável de intensidade é zero), ao passo que a fase obedece a uma função densidade de probabilidade *constante* ou *uniforme* (qualquer valor entre  $-\pi$  e  $\pi$  tem a mesma probabilidade).



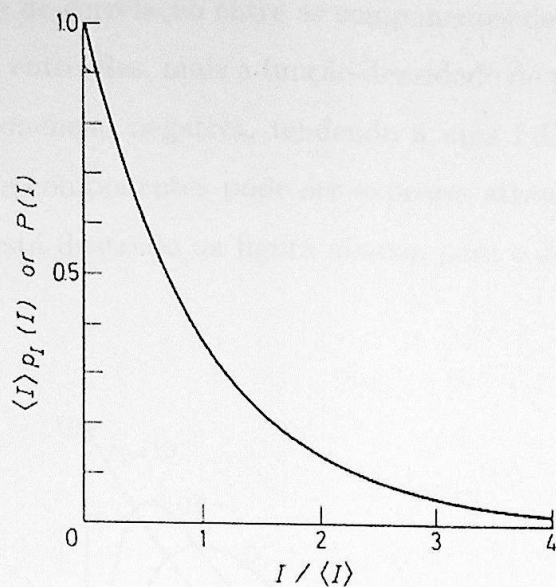


Fig. 2.4. Normalized probability density function and probability that the intensity exceeds level  $I$ , for a polarized speckle pattern

Figura 4.11: Função densidade de probabilidade normalizada e probabilidade de que a intensidade exceda o nível  $I$ , para um padrão de *speckle* polarizado [15].

Convém observar ainda que

$$p_{I,\theta}(I, \theta) = p_I(I) p_\theta(\theta) \quad (4.11)$$

isto é, a intensidade e a fase em qualquer ponto dado são estatisticamente independentes.

Em função do considerável aumento de complexidade do tratamento estatístico de primeira ordem aplicado à soma de dois padrões de *speckle* em relação àquele que vimos até o momento, e considerando que sua discussão aqui não enriqueceria substancialmente a compreensão do tema, teceremos apenas alguns comentários sobre seus resultados mais relevantes.

No caso de soma de padrões de *speckle* numa base de amplitudes conclui-se que a função densidade de probabilidade resultante continua a ser Gaussiana circular, e portanto as propriedades estatísticas não são alteradas, a não ser por um fator de escala.

Já quando a soma é realizada numa base de intensidades, o resultado varia em função

do grau de correlação entre as componentes de intensidade somadas. Quanto menor a correlação entre elas, mais a função densidade de probabilidade do padrão de *speckle* afasta-se da exponencial negativa, tendendo a uma f.d.p. semelhante à de Poisson. A correlação entre as componentes pode ser expressa através de *coeficientes de correlação*  $c_{kl}$ , e o seu efeito está ilustrado na figura abaixo, para o caso simples de duas componentes.

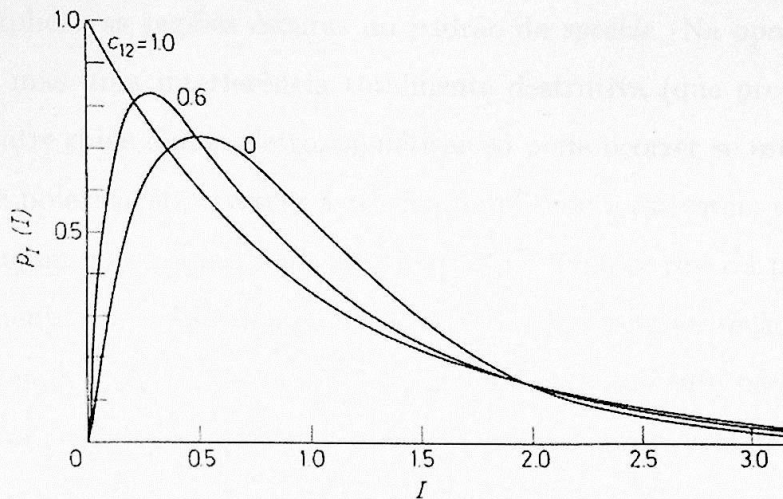


Fig. 2.6. Probability density functions for intensity of the sum of two speckle patterns with  $\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = \frac{1}{2}$  and  $c_{12} = 0, 0.6, 1.0$

Figura 4.12: Funções densidade de probabilidade para a intensidade da soma de dois padrões de *speckle*, com  $\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = 1/2$  e  $c_{12} = 0, 0.6, 1.0$  [15].

## 4.8 Influência da Polarização

Durante o processo de espalhamento por uma superfície rugosa a luz pode ser parcialmente despolarizada. Neste caso, o padrão de *speckle* obtido pode ser tratado como uma soma de dois padrões de *speckle* com polarizações lineares ortogonais ou de um padrão polarizado com outro não polarizado. Define-se então um parâmetro chamado *grau de polarização*  $\mathcal{P}$ , a razão entre a intensidade média da componente polarizada e a intensidade média total. Como trata-se novamente de uma soma de padrões de *speckle* a função densidade de probabilidade da intensidade total sofre também o efeito mostrado na figura 4.12.



Entre o grau de polarização  $\mathcal{P}$  e o coeficiente de correlação  $c_{kl}$  existe a relação

$$\mathcal{P} = \sqrt{c_{kl}}$$

de modo que as curvas para  $c_{kl} = 0, 0.6$  e  $1$  correspondem a valores de  $\mathcal{P} = 0, 0.774$  e  $1$ , respectivamente.

Utilizamos na seção 4.5 a idéia de interferência destrutiva de ondas eletromagnéticas para explicar as regiões escuras do padrão de *speckle*. Na oportunidade, não salientamos o fato, mas uma interferência totalmente destrutiva (que produza um campo resultante nulo) entre duas ondas eletromagnéticas só pode ocorrer se estas estiverem no mesmo estado de polarização, tiverem a mesma amplitude e estiverem defasadas de  $\pm\pi$ . Caso elas não estejam no mesmo estado de polarização, sempre restará pelo menos alguma pequena componente de campo não cancelada. Por isso é que na seção 4.7 acima e no capítulo 5 adiante supõe-se sempre padrões de *speckle* perfeitamente polarizados: esta consideração simplifica consideravelmente os modelos usados na previsão de suas propriedades.

Este fato está relacionado à mudança da forma da função densidade de probabilidade da intensidade do padrão de *speckle* que mencionamos no início desta seção. Quando o grau de polarização diminui, aumenta a probabilidade de sobrar alguma componente de campo não cancelada na ocorrência das interferências destrutivas entre as ondículas, diminuindo a probabilidade de se encontrar intensidades nulas na figura de *speckle*.

Quando a luz é refletida por materiais dielétricos sua polarização tem papel importante [10]. Suponhamos que a luz incidente seja linearmente polarizada e seu plano de polarização seja paralelo ao plano de incidência. Sob tais condições, quanto mais o ângulo de incidência se aproxime do ângulo de Brewster para o material em questão, menor será a intensidade da luz refletida.

O efeito descrito acima sugere que, ao se aplicar a Correlação Angular de *Speckle* na medição da rugosidade de materiais dielétricos, seja utilizada luz com polarização perpendicular ao plano de incidência, para evitar prejuízos na intensidade da luz espalhada.

## Capítulo 5

# CORRELAÇÃO ANGULAR DE *SPECKLE*

Apresentaremos neste capítulo os conceitos em que se baseia o método da Correlação Angular de *Speckle* e as equações utilizadas na interpretação dos dados obtidos através dele.

### 5.1 Medição da Rugosidade

Para a determinação de sua rugosidade, mede-se a correlação entre os padrões de *speckle* produzidos por uma superfície sob diferentes condições de iluminação. Quando o objeto está iluminado segundo a primeira condição forma-se um padrão de *speckle* que é registrado como referência. Quando se altera a condição de iluminação mudam os caminhos ópticos entre cada ponto da superfície examinada e cada ponto do anteparo onde se forma o padrão de *speckle*. Por isto as fases relativas das frentes de onda mudam, alterando interferências entre elas e conseqüentemente o padrão de *speckle*. Isto é percebido como uma mudança da forma e do brilho dos grãos de *speckle* e acontece, para uma dada variação da condição de iluminação, de maneira tanto mais pronunciada quanto mais rugosa for a superfície.

As alterações da condição de iluminação podem ser realizadas pela mudança do comprimento de onda utilizado, pela mudança do índice de refração do meio onde a luz se propaga ou pela mudança do ângulo de incidência do feixe. Neste trabalho utilizamos esta última



técnica, a qual é chamada de Correlação Angular de *Speckle* (que passaremos a abreviar por CAS).

## 5.2 Fundamentos Teóricos

### 5.2.1 Fundamento Conceitual

Para que se possa entender como funciona a CAS geralmente recorreremos a uma analogia. Imaginemos um passageiro em um avião observando o relevo do solo. Suponhamos que ele fixa o olhar em uma região que está adiante, sobre a qual o avião irá passar, e vai alterando o ângulo de observação conforme o avião se aproxima dela. Se estiver sobrevoando uma planície, por exemplo, não notará muita diferença entre o que vê segundo um ângulo mais raso e um ângulo mais inclinado em relação à superfície. Já se a região for montanhosa, conforme o avião vá se aproximando da parte do relevo observada ele terá uma nova perspectiva e poderá enxergar muitos detalhes ocultos anteriormente. Na CAS ocorre algo semelhante. Nosso plano de observação do padrão de *speckle* faz o papel do passageiro no avião. A região sobre a qual incide o feixe *laser* na amostra (e que espalha a luz que irá formar o padrão de *speckle*) é a região do relevo observada. A alteração do ângulo de observação é a mudança da condição de iluminação que fazemos. Da mesma forma que a paisagem vista muda de forma mais perceptível quando o relevo é montanhoso, o padrão de *speckle* sofre maiores alterações com a mudança de ângulo se a amostra é mais rugosa.

### 5.2.2 Cálculo da Correlação entre Imagens

Vimos que a maior ou menor alteração do padrão de *speckle* com a mudança da condição de iluminação indica maior ou menor rugosidade da superfície espalhadora, mas para que se possa falar de medição é necessário quantificar tal alteração. Utilizamos uma câmera *CCD* para registrar ambos os padrões (aquele formado segundo a condição inicial e o outro, semelhante, obtido após a alteração do ângulo de iluminação). Este dispositivo, conectado a um computador através de uma placa digitalizadora de imagens, permite uma conversão das intensidades luminosas em cada ponto do padrão de *speckle* para uma escala

de tons de cinza (utilizamos uma câmera monocromática) na qual um ponto totalmente escuro corresponde a zero e um ponto com máxima intensidade luminosa corresponde a 255. Assim temos uma tabela dos valores de tom de cinza para a imagem de referência e outra para a imagem do padrão alterado. Comparamos então tais tabelas utilizando o conceito de correlação usual em estatística, definido, por exemplo, por Vanin *et al.* (1998) [16], e calculado por:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5.1)$$

onde  $C$  é a correlação entre as imagens,  $r_i$  são os valores de tom de cinza correspondentes aos pontos da imagem de referência (cuja média é  $\bar{r}$ ) e  $x_i$  são os valores de tom de cinza correspondentes aos pontos da imagem do padrão alterado (cuja média é  $\bar{x}$ ).

Calculada desta maneira, a correlação de duas imagens idênticas resulta 1 e a de duas imagens em que uma seja o negativo da outra resulta -1. Se as imagens são muito parecidas (ou seja, se os valores de tom de cinza da maioria dos pontos de uma são muito próximos aos valores de tom de cinza dos pontos correspondentes na segunda) o resultado do cálculo de correlação entre elas é próximo de 1. Já se as imagens são muito diferentes, sua correlação é próxima de zero.

### 5.2.3 Equação Teórica

Uma vez esclarecida a idéia por trás da medição de rugosidade através da CAS, surge uma pergunta: "Como estabelecer a relação entre a rugosidade da superfície e a correlação entre os padrões de *speckle*?". Para isto recorreremos a uma equação deduzida por Rebollo (1995) [5] *et al.* (1991) [17] a partir do trabalho de Goodman (1984) [15] a respeito das propriedades estatísticas dos padrões de *speckle* e dos estudos de Beckmann & Spizzichino (1963) [18] sobre o espalhamento de ondas eletromagnéticas por superfícies rugosas e de Léger (1976) [19] *et al.* (1975) [20] sobre a medição de rugosidade usando a técnica de correlação de *speckle*. Na realidade Rebollo (1995) [5] introduz na equação, para a situação geométrica em que trabalhamos, uma correção que julgamos equivocada, conforme argu-



mentaremos adiante.

**Hipóteses.** Nos trabalhos citados os autores adotam algumas hipóteses, quais sejam:

- a onda incidente é plana, linearmente polarizada e perfeitamente coerente e monocromática;
- as flutuações de fase introduzidas pela superfície espalhadora são maiores que  $2\pi$  (isto é, suas irregularidades são maiores que o comprimento de onda da luz utilizada);
- no processo de espalhamento não há despolarização da luz (ou seja, o padrão de *speckle* é perfeitamente polarizado);
- a superfície espalhadora tem irregularidades aleatoriamente distribuídas e sua distribuição de alturas obedece a uma função densidade de probabilidade Gaussiana;
- o raio de curvatura das irregularidades é grande em comparação com o comprimento de onda;
- a superfície espalhadora apresenta uma "rugosidade suave", ou seja, com o espaçamento entre as irregularidades muito maior que sua amplitude;
- a superfície espalhadora é perfeitamente condutora (portanto, perfeitamente refletora);
- efeitos de espalhamento múltiplo e de sombra são negligenciados;
- as amplitudes e as fases das ondículas espalhadas pela superfície são estatisticamente independentes entre si e umas das outras;
- as fases das ondículas espalhadas pela superfície têm distribuição uniforme no intervalo  $(-\pi, \pi)$ ;
- para cada ponto do plano de observação contribuem ondículas provenientes de um grande número de centros espalhadores na superfície;
- plano de observação encontra-se suficientemente afastado da superfície espalhadora para que se possa considerar válida a aproximação de Fraunhofer para a luz difratada.

Pode-se notar que muitas destas propriedades já foram expostas na seção 4.7, quando discutimos as propriedades estatísticas do padrão de *speckle*.

**Validade.** A imposição de tantas condições poderia inspirar certa desconfiança quanto à validade de aplicação da técnica em situações reais. No entanto nossas observações experimentais ratificam alguns comentários dos autores citados, por exemplo:

- Rebollo (1995) [5] diz (pag. 12): *"Es importante destacar que las condiciones de contorno de Kirchhoff simplifican el problema considerablemente pero son inconsistentes; las dificultades provienen de imponer condiciones de contorno sobre el campo y su derivada<sup>1</sup>. Es sabido de la teoría de potencial que si una función bidimensional y su derivada normal se anulan sobre algún elemento de curva, entonces la función debe ser nula en todo el plano. De la misma manera, si la ecuación de onda tridimensional se anula sobre algún elemento de superficie, debe anularse en todo el espacio. Otra forma de ver la inconsistencia es el hecho que la teoría falla al reproducir las condiciones de contorno a medida que el punto de observación se acerca a la abertura (en nuestro caso a  $S_D$ ) o a la pantalla  $S_P$ .*

*A pesar de estas contradicciones, los resultados de Kirchhoff en la mayoría de los casos concuerdan sorprendentemente bien con los experimentos."*

- na mesma referência, à pag. 34 lemos: *"Un conjunto importante de experiencias realizadas para medir el valor medio de la intensidad dispersada cuando la luz incide sobre una superficie rugosa, como por ejemplo las realizadas por Houchens y Herrings [22], por Hensler [23] y en particular por O'Donnell y Méndez, confirman la validez de la teoría desarrollada por Beckmann y Spizzichino [18] dentro de las aproximaciones consideradas por ellos.*

---

<sup>1</sup>Cabe aqui uma ressalva. Em 1882 Kirchhoff lançou sua teoria com estas duas condições de contorno, cuja inconsistência mútua foi demonstrada por Poincaré em 1892 e por Sommerfeld em 1894. Algum tempo depois, no entanto, o próprio Sommerfeld reformulou esta teoria utilizando a teoria da função de Green e obteve a teoria de difração de Rayleigh-Sommerfeld, que prescinde da imposição de uma das condições de contorno, eliminando portanto a inconsistência matemática. Este assunto está discutido com mais detalhes em Goodman (1996) [21], cap. 3.



Entonces aunque no es demasiado claro que las condiciones de contorno de Kirchhoff sean apropiadas para el tratamiento de superficies tales como las de un vidrio esmerilado en la región óptica, las teorías basadas en esta aproximación, parecen predecir resultados razonables.”

- e pouco adiante, nas pags. 36 e 37: “La línea sólida es la solución de Beckmann y los puntos son los datos experimentales. Es notable la concordancia de los datos con la teoría.

Esta curva representa la primera verificación experimental de la teoría de Beckmann con una superficie de estadística bien definida y podría ser inversamente tomada como una verificación de que esa superficie tiene una distribución de pendientes que es Gaussiana.

Los autores de este trabajo aseguran que la coincidencia de las mediciones experimentales con la teoría de Beckmann, continúa hasta ángulos de incidencia  $< 50^\circ$ .”

- segundo Goodman (1984) [15] (pag. 15): “In the vast majority of cases of practical interest, the asymptotic results derived can be used with an extremely high degree of accuracy.”
- e de maneira semelhante Léger (1975) [20] afirma (pag. 876): “When the aforementioned approximations are not valid, it is necessary to use the general solution. Nevertheless, the approximation of very rough surfaces (Sec. III. A) is valid in most practical cases.

**Dedução.** Rebollo (1991) [17] inicia sua dedução com a expressão de Beckmann para a distribuição de amplitudes observada em determinada direção para uma onda plana coerente espalhada por uma superfície rugosa:

$$A(\theta_2) = \frac{A_0}{2L} \int \exp[iv_x x + v_z \xi(x)] dx \quad (5.2)$$

onde  $A(\theta_2)$  é a distribuição de amplitudes observada sob o ângulo de espalhamento  $\theta_2$ ;  $A_0$  é a amplitude da onda plana coerente incidente;  $2L$  é o tamanho da pupila iluminada sobre a superfície (Rebollo trabalha no caso unidimensional);  $x$  é a coordenada no plano

da superfície;  $\xi(x)$  é a distribuição de alturas da superfície rugosa e  $v_x$  e  $v_z$  são dados pelas equações:

$$v_x = \frac{2\pi}{\lambda}(\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_2) = k(\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_2) \quad (5.3)$$

$$v_z = \frac{2\pi}{\lambda}(\text{cos}\theta_1 + \text{cos}\theta_2) = k(\text{cos}\theta_1 + \text{cos}\theta_2) \quad (5.4)$$

nas quais  $\lambda$  é o comprimento de onda plana coerente;  $\theta_1$  é o ângulo de incidência desta onda sobre a superfície;  $k$  é conhecido como número de onda (ou módulo do vetor de onda) da luz.

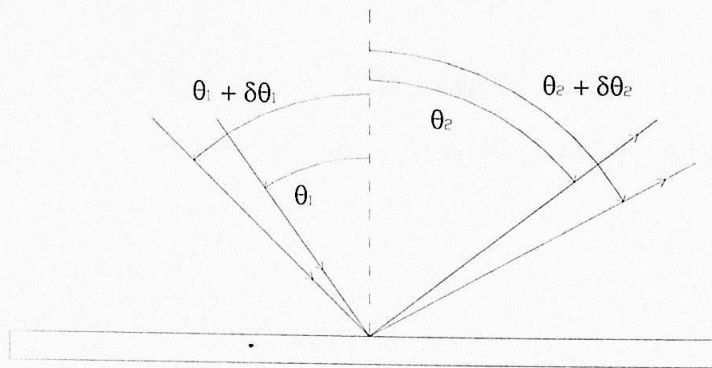


Figura 5.1: Ilustração dos ângulos de incidência da iluminação e de observação do espalhamento iniciais e após um pequeno deslocamento angular (baseada em figura de Rebollo (1995) [5]).

Para calcular a distribuição de amplitudes observada ao se iluminar a superfície rugosa sob um ângulo de incidência ligeiramente diferente, deve-se substituir os ângulos de incidência e de espalhamento nas expressões 5.2, 5.3 e 5.4 por  $(\theta_1 + \delta\theta_1)$  e  $(\theta_2 + \delta\theta_2)$ , respectivamente.

A correlação entre estas distribuições de amplitudes será então [19]

$$C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = \frac{\langle A(\theta_2)A^*(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle}{\langle A(\theta_2)A^*(\theta_2) \rangle}. \quad (5.5)$$



Pode-se demonstrar que esta expressão resulta em

$$C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = \text{sinc}(\Delta v_x L) e^{\left(-\frac{\sigma^2}{2} \Delta v_z^2\right)} \quad (5.6)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão da distribuição de alturas  $\xi(x)$  (esta é a medida de rugosidade que obteremos) e

$$\Delta v_x = v'_x - v_x \quad (5.7)$$

$$\Delta v_z = v_z - v'_z \quad (5.8)$$

com

$$v'_x = k[\text{sen}(\theta_1 + \delta\theta_1) - \text{sen}(\theta_2 + \delta\theta_2)] \quad (5.9)$$

$$v'_z = k[\text{cos}(\theta_1 + \delta\theta_1) + \text{cos}(\theta_2 + \delta\theta_2)]. \quad (5.10)$$

Usando 5.9 e 5.3 em 5.7 obtemos

$$\Delta v_x = k[\text{sen}\theta_1(\text{cos}\delta\theta_1 - 1) - \text{sen}\theta_2(\text{cos}\delta\theta_2 - 1) + \text{cos}\theta_1\text{sen}\delta\theta_1 - \text{cos}\theta_2\text{sen}\delta\theta_2]. \quad (5.11)$$

De modo semelhante, usando 5.4 e 5.10 em 5.8 obtemos

$$\Delta v_z = k[\text{cos}\theta_1(1 - \text{cos}\delta\theta_1) + \text{cos}\theta_2(1 - \text{cos}\delta\theta_2) + \text{sen}\theta_1\text{sen}\delta\theta_1 + \text{sen}\theta_2\text{sen}\delta\theta_2]. \quad (5.12)$$

Se consideramos que os deslocamentos angulares são pequenos

$$\delta\theta_1, \delta\theta_2 \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{cos}\delta\theta_1, \text{cos}\delta\theta_2 \rightarrow 1 \\ \text{sen}\delta\theta_1 \rightarrow \delta\theta_1 \\ \text{sen}\delta\theta_2 \rightarrow \delta\theta_2 \end{cases}$$

5.11 e 5.12 poderão ser escritas simplesmente

$$\Delta v_x = k[\cos\theta_1\delta\theta_1 - \cos\theta_2\delta\theta_2] \quad (5.13)$$

$$\Delta v_z = k[\text{sen}\theta_1\delta\theta_1 + \text{sen}\theta_2\delta\theta_2]. \quad (5.14)$$

Para que a correlação não dependa do tamanho do diafragma, impomos a condição

$$\begin{aligned} \text{sinc}(\Delta v_x L) = 1 &\Rightarrow \Delta v_x = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \delta\theta_2 = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}\delta\theta_1. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Usando então a condição 5.15 as equações 5.14 e 5.6 ficam

$$\Delta v_z = k \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_2} \delta\theta_1 \quad (5.16)$$

e

$$C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = e^{-\frac{\sigma^2}{2} \left[ k \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_2} \delta\theta_1 \right]^2} \quad (5.17)$$

Esta equação expressa a correlação entre as distribuições de amplitudes espalhadas por uma superfície rugosa sob dois ângulos de incidência ligeiramente diferentes da iluminação. Os meios de detecção da luz habitualmente utilizados, no entanto, registram a intensidade luminosa. Sendo assim, precisamos conhecer a correlação entre as distribuições de intensidades espalhadas pela superfície. Léger (1976) [19] mostra que

$$C_I(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = [C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2)]^2$$

o que em nosso caso conduz a

$$C_I(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = e^{-\sigma^2 \left[ k \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_2} \delta\theta_1 \right]^2} \quad (5.18)$$



Neste ponto, Rebollo (1995) [5] supõe que a superfície seja iluminada segundo uma direção  $\theta_1$  e em seguida girada de um ângulo  $\delta\theta_1$ . Segundo ela a figura de *speckle* se deslocará de um ângulo  $\delta\theta_2$ , conforme a figura 5.1, mais um ângulo adicional  $\delta\theta_1$ , devido à rotação da superfície, conforme a figura 5.2.

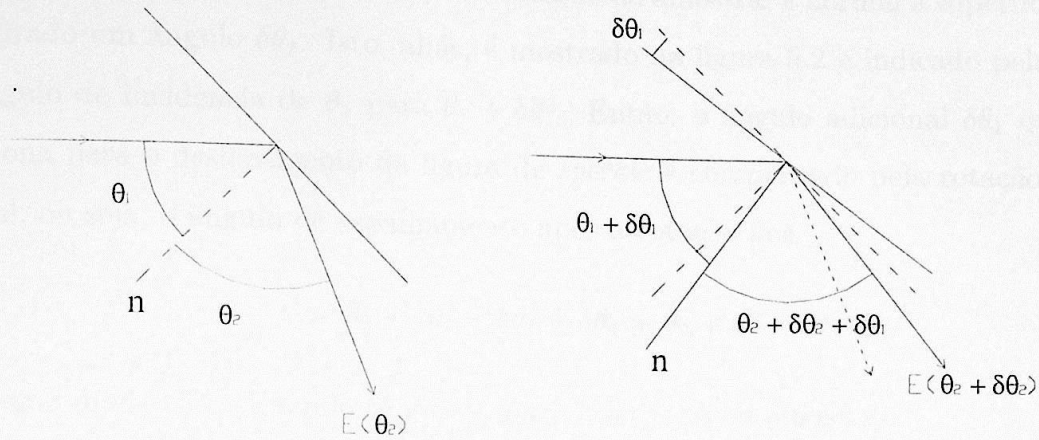


Figura 5.2: Esquema da alteração do ângulo de incidência da iluminação através da rotação da amostra (baseado em figura de Rebollo (1995) [5]).

Daí vem a conclusão de que

$$\delta\theta_2 = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \delta\theta_1 + \delta\theta_1. \quad (5.19)$$

Como a imagem é tomada na direção de reflexão, de modo que  $\theta_1 = \theta_2$ , tem-se

$$\delta\theta_2 = 2\delta\theta_1. \quad (5.20)$$

Escrevendo o coeficiente de correlação em função da variação do ângulo de incidência  $\delta\theta_1 = \delta\theta$  Rebollo chega a

$$\rho_f = e^{-\sigma^2 k^2 (4\text{sen}\theta\delta\theta)^2}. \quad (5.21)$$

Em nossa opinião há um equívoco na argumentação apresentada. Rebollo afirma que ao rodar a amostra de um incremento angular  $\delta\theta_1$  a figura de *speckle* se terá deslocado um ângulo  $\delta\theta_2$  como indica a figura 5.1 e um ângulo adicional  $\delta\theta_1$  devido à rotação da superfície como indica a figura 5.2. De fato, concordamos que neste caso, entre as direções de espalhamento antes e após a rotação da amostra há um ângulo igual a  $\delta\theta_1 + \delta\theta_2$ . No entanto, não se pode esquecer que após a rotação da amostra, a normal à superfície também terá girado um ângulo  $\delta\theta_1$ . Isto, aliás, é mostrado na figura 5.2 e indicado pela mudança do ângulo de incidência de  $\theta_1$  para  $\theta_1 + \delta\theta_1$ . Então, o ângulo adicional  $\delta\theta_1$  que Rebollo menciona para o deslocamento da figura de *speckle* é compensado pela rotação de  $\delta\theta_1$  da normal, ou seja, o ângulo de espalhamento após a rotação fica

$$\theta_2 + \delta\theta_2 + \delta\theta_1 - \delta\theta_1 = \theta_2 + \delta\theta_2$$

do mesmo modo como quando se gira a fonte *laser* e não a amostra.

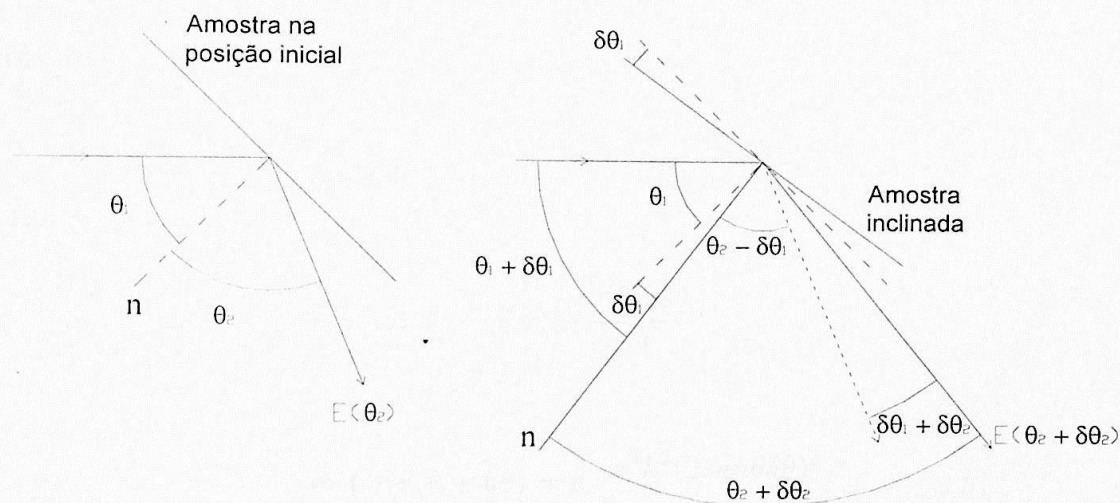


Figura 5.3: Esquema da alteração do ângulo de incidência da iluminação através da rotação da amostra, de acordo com nossa correção.

Uma vez isto estabelecido, não há razão para se adicionar a parcela  $\delta\theta_1$  à equação 5.15, e a prática adotada no experimento de se registrar a figura de intensidades do padrão de



*speckle* na direção de reflexão especular, fazendo

$$\theta_2 = \theta_1 = \theta \quad (5.22)$$

conduz simplesmente a

$$\delta\theta_2 = \delta\theta_1 = \delta\theta. \quad (5.23)$$

A figura 5.3 mostra que quando se mantém a direção de incidência do feixe de laser fixa e se faz a mudança do ângulo de incidência através da rotação da amostra, a direção de observação é girada de um ângulo  $\delta\theta_1 + \delta\theta_2$  em relação à sua posição inicial. Quando se usa ângulos de incidência e observação iguais (veja as equações 5.22 e 5.23) tem-se  $\delta\theta_1 + \delta\theta_2 = 2\delta\theta$ . Assim, embora a alteração do ângulo de observação (medido em relação à normal à superfície) seja apenas  $\delta\theta$ , para obtê-la experimentalmente gira-se a amostra de  $\delta\theta$  e a câmara CCD de  $2\delta\theta$ . Esta é, provavelmente, a origem do engano de Rebollo.

Aplicando agora 5.22 e 5.23 acima à equação 5.18 temos

$$\begin{aligned} C_I(\theta, \theta + \delta\theta) &= e^{-\sigma^2 \left[ k \frac{\text{sen}(2\theta)}{\cos\theta} \delta\theta \right]^2} = \\ &= e^{-\sigma^2 \left( k \delta\theta \frac{2\text{sen}\theta \cos\theta}{\cos\theta} \right)^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow C_I(\theta, \theta + \delta\theta) &= e^{-\sigma^2 k^2 (2\text{sen}\theta \delta\theta)^2}. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Portanto, a adição de um termo  $\delta\theta_1$  realizada por Rebollo havia feito com que aparecesse um fator 4 na exponencial de sua equação 5.21, ao passo que a equação 5.24 mostra que deveria haver apenas um fator 2. Esta é a equação que utilizamos para o ajuste dos dados experimentais ao longo deste trabalho.

Um olhar um pouco mais atento à equação 5.24 permitirá identificá-la com uma gaussiana centrada na origem. Como trabalhamos com incrementos angulares sempre para um mesmo lado, tomado como positivo, as curvas resultantes são semelhantes às apresentadas na figura 5.4 abaixo, nas quais pode-se perceber a rugosidade quadrática média como um parâmetro que determina se a curva terá um declínio mais suave (para valores mais baixos de rugosidade) ou mais acentuado (para valores de rugosidade mais elevados).

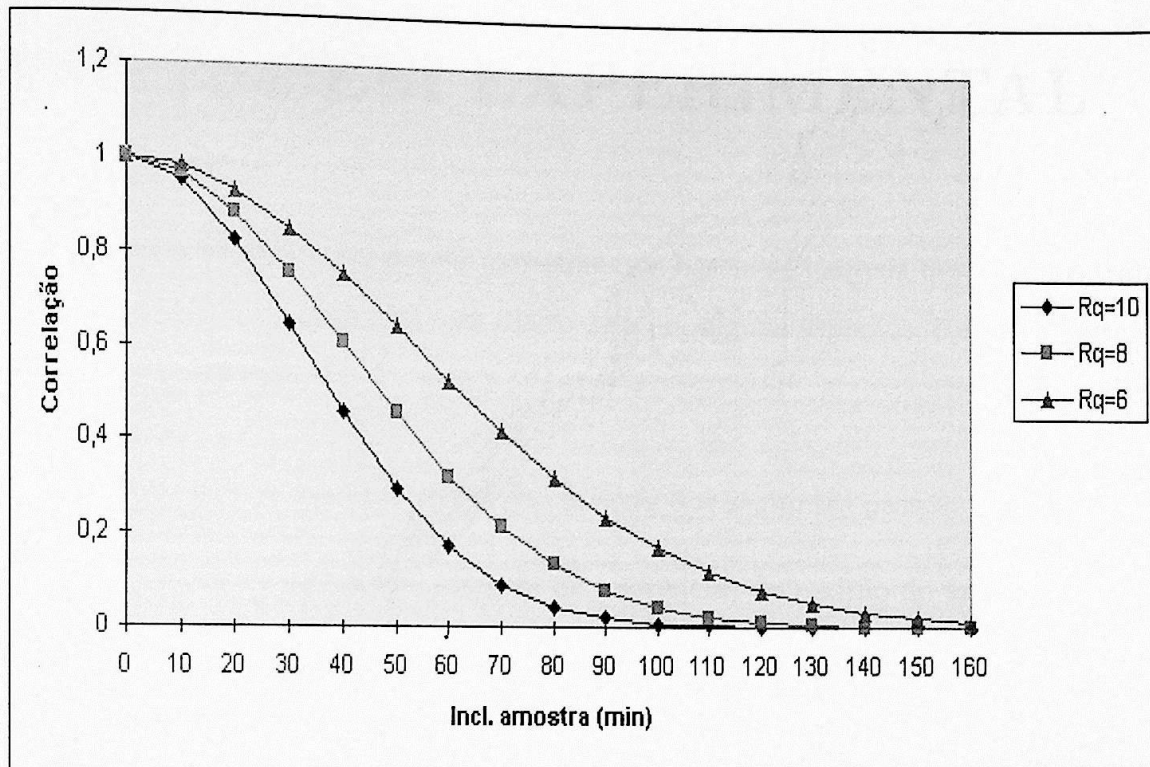


Figura 5.4: Curvas teóricas da correlação dos padrões de *speckle* em função da inclinação da amostra.



## Capítulo 6

# MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem utilizada em nossos experimentos baseia-se naquela descrita nos trabalhos de Rebollo (1991) [17] (1995) [5] mas difere dela em alguns aspectos, conforme descreveremos em detalhe adiante.

O procedimento de medição é descrito através dos seguintes passos:

1. registro da imagem inicial (imagem de referência) do padrão de *speckle*;
2. aplicação de rotação de um pequeno ângulo ( $\delta\theta$ ) à amostra;
3. rotação da câmara CCD de um ângulo ( $2\delta\theta$ ) em torno do eixo de rotação da amostra;
4. registro de nova imagem do padrão de *speckle*;
5. cálculo da correlação entre a nova imagem e a imagem de referência;
6. repetição das etapas 2 a 5 até que se obtenha outros pontos experimentais para o ajuste da expressão teórica;
7. ajuste da curva teórica aos dados experimentais, determinando o parâmetro de rugosidade.

## 6.1 Descrição do Arranjo Experimental

Para a utilização da CAS para medição de rugosidade foi feita a montagem experimental mostrada na figura 6.1.

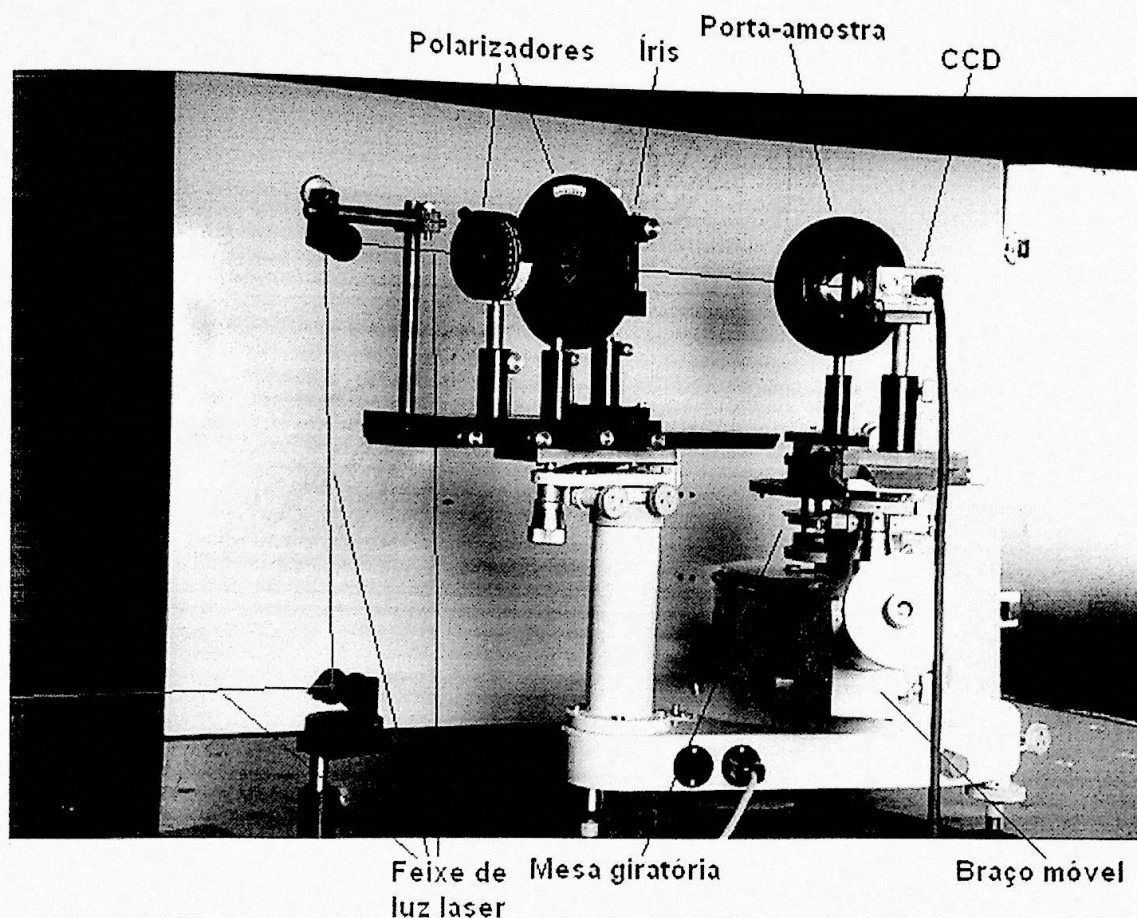


Figura 6.1: Foto do arranjo experimental para medição de rugosidade por CAS do Laboratório de Óptica do IFUSP.

Sobre uma mesa de granito apoiada em uma estrutura bastante robusta de madeira, da qual está separada por uma camada de espuma para amortecimento de vibrações, colocamos um goniômetro (em branco na figura 6.1) que nos permite controlar os ângulos de incidência e de observação. Retiramos o colimador que existia originalmente no braço fixo do goniômetro para fazer incidir por ali sobre a amostra o feixe de *laser*. A fonte de *laser* que utilizamos é de HeNe, com comprimento de onda de 632,8nm e potência de até 10mW. Colocamos neste braço um trilho para fixação dos polarizadores e diafragmas que utilizamos



para controlar tanto a intensidade como a abertura da luz incidente. Inicialmente também fixamos neste trilho lentes esféricas e cilíndricas para controle da convergência do feixe incidente e do tamanho e da forma da pupila iluminada sobre a amostra. Chegamos, no entanto, à conclusão de que poderíamos usar o feixe de *laser* sem expansão e sem focalização sobre a amostra. Isto tornaria a montagem mais simples e ao mesmo tempo mais próxima das hipóteses de formulação teórica, que sempre tratam da incidência de uma onda plana sobre a amostra.

Montamos o porta-amostras na mesa central, giratória, do goniômetro. Conforme já mencionamos, em nosso arranjo alteramos o ângulo de incidência da iluminação girando a amostra, pois isto é mais simples que mover a fonte de *laser* e os componentes de controle do feixe. Por isto temos o porta-amostras apoiado em deslocadores horizontais perpendiculares entre si, para que possamos posicionar a região de interesse da amostra sobre o eixo de rotação da mesa, onde passa o feixe de *laser*. A mesa possui ainda parafusos niveladores para controle da inclinação do porta-amostras.

No braço móvel do goniômetro colocamos um trilho para fixação da câmara *CCD* em um suporte. Este é outro aspecto em que nosso arranjo experimental diferencia-se dos de Rebollo, nos quais os deslocamentos da câmara *CCD* eram feitos sobre um deslocador linear orientado perpendicularmente à direção de visada e convertidos em deslocamento angular através de um cálculo de tangente. Em nosso caso o deslocamento, realizado com o braço móvel do goniômetro, é efetivamente uma rotação que não necessita da conversão de deslocamento linear para angular e possui a vantagem adicional de preservar exatamente a mesma distância da câmara à amostra nas várias tomadas de imagens. Mudando sua posição sobre o trilho, podemos colocar a câmara *CCD* mais próxima ou mais distante da amostra, de modo a controlar o tamanho dos grãos de *speckle*. Lembramos que registramos o padrão de *speckle* espalhado pela superfície no espaço livre, sem a utilização de qualquer objetiva na câmara, de modo que não temos uma imagem da amostra. No braço móvel do goniômetro temos também sua ocular (logo abaixo da câmara *CCD* na figura 6.1) pela qual se faz as leituras da escala angular para controle das rotações da mesa e do braço móvel.

O esquema abaixo representa a vista superior desta montagem experimental.

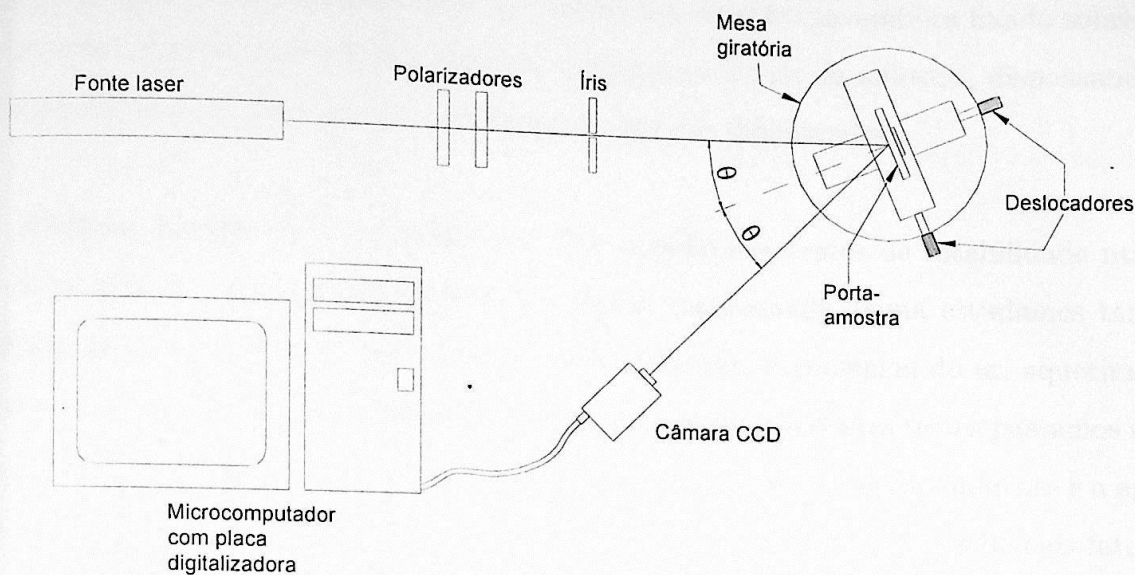


Figura 6.2: Esquema do arranjo experimental da figura 6.1.

### 6.1.1 Aperfeiçoamentos do Arranjo

O suporte da fonte de *laser*. Inicialmente tínhamos a própria fonte de *laser* apoiada no trilho que colocamos sobre o braço fixo do goniômetro. Isto resultava em um peso considerável deslocado do ponto de apoio do trilho, algo análogo a uma viga em balanço, produzindo grande instabilidade mecânica.

Comprovamos esta instabilidade através da correlação de padrões de *speckle*: tomamos primeiro uma imagem de referência e depois outras imagens, separadas por intervalos regulares de tempo, sem que tocássemos na montagem; a correlação de cada imagem posterior com a de referência apresentava queda, indicando que apesar tudo estar supostamente fixo, havia variações do padrão de *speckle*.

Para resolver este problema, que inviabilizava as medições, passamos a usar a fonte de



*laser* apoiada num suporte fixado diretamente sobre a mesa de granito e a desviar o feixe para a altura da amostra através de dois espelhos (que aparecem na figura 6.1, um sobre a mesa e outro preso na extremidade do trilho por um sistema de hastes). Algum tempo depois fizemos uma nova alteração, utilizando um suporte que embora fixado sobre a mesa de granito permite que a fonte *laser* seja colocada à altura da amostra, dispensando o uso dos espelhos, cujo alinhamento apresentava algumas dificuldades.

**Outras fontes de instabilidade.** Por ocasião dos testes de estabilidade utilizando a correlação de imagens dos padrões de *speckle* mencionada acima estudamos também a influência de vibrações do piso, temperatura ambiente, turbulência do ar, aquecimento da fonte de *laser* e da câmara *CCD*. Em função dos resultados destes testes passamos a trabalhar sempre com um condicionador de ar controlando a temperatura ambiente e a aguardar sempre um período de aquecimento do *laser* de cerca de uma hora. Os demais fatores não revelaram influência que inspirasse cuidados especiais.

**O controle da iluminação.** Quando começamos a trabalhar com o experimento, utilizávamos um expansor (filtro espacial e lente de colimação) para o feixe de *laser* e a seguir controlávamos o diâmetro iluminado com um diafragma íris. Acabamos por concluir que o diâmetro do feixe não expandido é adequado às medições que realizamos e assim deixamos de usar o expansor. O feixe não expandido, porém, resulta em intensidade luminosa excessiva sobre a câmara *CCD*, causando saturação dos pixels correspondentes aos grãos mais claros do padrão de *speckle*. Por isto introduzimos os polarizadores mencionados anteriormente para controlar a intensidade do feixe incidente sobre a amostra. Em nosso experimento a fonte de *laser* usada é polarizada, mas no caso de utilização de uma fonte não polarizada o emprego de polarizadores também contribui no sentido de aproximar as condições experimentais das hipóteses teóricas, construídas sobre a suposição de luz incidente polarizada.

### 6.1.2 Câmara CCD

A câmara CCD utilizada é do modelo KP-M1U, da Hitachi Denshi, Ltd. Ela fornece imagens de 8 bits em escala de níveis de cinza e cada pixel fornece intensidade variando de 0 a 255.

É importante destacar um trabalho de análise desta câmara feito por Blane *et al.* (1998) [24] utilizando figuras de difração bem conhecidas. Neste trabalho os autores verificaram a ótima linearidade da câmara, apuraram que sua resolução espacial é de  $70\mu m$  e que a distância entre pixels é de  $12,30(16)\mu m$  (direção x) e  $12,30(14)\mu m$  (direção y).

Cabe mencionar que dispomos em nosso laboratório de duas destas câmaras, e que ao utilizar uma ou outra notamos diferença no ruído de fundo das imagens. Verificamos este ruído de fundo tomando imagens com a câmara tampada. Para uma delas os pixels mais escuros de uma destas imagens ficavam por volta de dez na escala de tons de cinza, enquanto para a outra ficavam por volta de 37. É vantajoso o uso de uma câmara que produza menor ruído de fundo, para que reste uma parte maior da escala de tons de cinza para a comparação das imagens dos padrões de *speckle*.

### 6.1.3 Programas de Cálculo e de Captura de Imagens

Para a captura de imagens utilizamos placas digitalizadoras da Data Translation. Inicialmente o sistema foi montado com uma placa do modelo DT55-60, que fornece imagens de  $640 \times 480$  pixels, com 256 níveis de tom de cinza (monocromática). Depois utilizamos uma placa do modelo DT3155, de características técnicas equivalentes às da DT55-60, porém mais rápida. Também neste caso observamos diferença entre os resultados. Ao realizarmos testes de estabilidade do padrão inicial de *speckle* (descritos adiante, na subseção 6.2.2) constatamos que o sistema montado com a placa DT3155 mantém, quando a amostra está estável e bem fixada, correlação acima de 0,99 ao longo do teste. Com a placa DT55-60 é possível manter esta correlação acima de 0,999. Atribuímos esta pequena queda de correlação durante os testes de estabilidade a ruídos introduzidos na imagem do padrão



de *speckle* pelo sistema. Assim, o sistema que mantém a imagem mais estável pode ser considerado melhor, por introduzir menos erro na avaliação da queda de correlação entre os padrões de *speckle* quando se procede a medição da CAS.

Para a captura das imagens utilizamos o programa Global Lab Image, versão 3.1, da Data Translation. Para os cálculos de correlação entre as imagens é utilizado um programa denominado Pearson6, desenvolvido por Diogo Soga (Laboratório de Óptica do IFUSP) especificamente para este fim.

O programa Pearson6 foi construído sob o ambiente MS Windows 3.11 com o compilador Borland C++ v4.5. Foi escolhido o sistema operacional MS Windows 3.11 devido ao fato da placa DT3155 operar com o programa Global Lab Image somente sob este sistema operacional.

Utilizamos ainda o programa Microcal Origin versão 5.0, para fazer o ajuste da curva teórica sobre os dados experimentais e assim obter o parâmetro de rugosidade e os gráficos para apresentação dos resultados da medição.

O procedimento utilizado é o seguinte :

1. capturar as imagens;
2. calcular os valores de correlação;
3. ajustar a curva de correlação para calcular a rugosidade.

## 6.2 Procedimento Experimental

### 6.2.1 Alinhamentos Preliminares

Inicialmente nivelamos o goniômetro, através de parafusos em seus pés. Colocamos um nível de bolha sobre o braço móvel do aparelho, que é posicionado em direção perpendicular a seu braço fixo. Giramos o braço móvel de 180° sucessivas vezes e ajustamos a altura dos

pés até que o nível de bolha mostre que o goniômetro está nivelado nesta direção. A seguir posicionamos o braço móvel em oposição ao braço fixo e ajustamos novamente a altura dos pés de modo a nivelar o aparelho na direção perpendicular à anterior.

Utilizando os deslocadores horizontais posicionamos o porta-amostras de modo que a superfície a ser medida contenha o eixo de rotação da mesa giratória. Fazemos também com que o feixe de *laser* cruze este eixo. Asseguramos tais posicionamentos colocando no porta-amostras uma peça vazada com um fio fino na posição onde estaria a superfície da amostra a ser medida. Girando a mesa do goniômetro vamos fazendo correções até que, independente da posição de rotação o fio esteja sempre no centro do feixe de *laser*.

Tratamos então de garantir que a incidência do feixe de *laser* seja perpendicular ao eixo de rotação da mesa giratória e paralela ao plano de rotação do braço móvel do goniômetro. Fazemos isto colocando um espelho no lugar da amostra e verificando simultaneamente que:

1. quando o feixe refletido volta sobre o incidente atinja exatamente a saída do *laser*; caso necessário ajustamos os parafusos de nivelamento da mesa giratório para que isto ocorra (o que por vezes implica em repetição do posicionamento mencionado no parágrafo anterior);
2. quando o feixe é refletido em outra direção, atinja a câmara CCD, já colocada sobre o braço móvel do goniômetro, sempre na mesma altura (se preciso, corrigimos a inclinação do *laser*).

Colocamos o braço móvel do goniômetro em oposição ao braço fixo e posicionamos a câmara CCD tal que o feixe *laser* incida em seu centro. Nesta posição ajustamos a escala angular em  $180^\circ$ , tomando cuidado para que seu parafuso de deslocamento angular fino tenha curso para girá-la em sentido anti-horário (quando se olha o goniômetro de cima). Em seguida posicionamos o braço móvel em  $315^\circ$  da escala angular (ou seja, a  $45^\circ$  da direção de incidência do feixe), também verificando que seu parafuso de deslocamento fino possa girá-lo no sentido anti-horário. Utilizando novamente o espelho no lugar da amostra,



giramos a mesa central onde está fixado o porta-amostras até que o feixe de *laser* refletido incida no centro da câmara CCD. Quando isto ocorre sabemos que o ângulo de incidência inicial (o  $\theta$  da equação 5.24) está ajustado para  $22,5^\circ$  e fixamos a mesa central à escala angular, de modo que aquela passe a se movimentar apenas solidariamente a esta.

### 6.2.2 Ajustes e Testes Iniciais

Terminados os alinhamentos preliminares, substituímos o espelho pela amostra.

Através da posição dos polarizadores controlamos a intensidade do *laser* incidente. Inicialmente nosso critério era que nenhum dos pixels da câmara CCD ficasse saturado de luz (com indicação de tom de cinza igual a 255), mas que os mais iluminados ficassem próximos da saturação. Depois passamos a ajustar os polarizadores de modo que o número de pixels com tons de cinza acima de 250 fosse pequeno, ainda que parte deles estivesse saturada.

Testamos em seguida a estabilidade do padrão de *speckle*. Para isto fazemos tomadas de imagens a intervalos regulares de tempo, sem alterar a montagem experimental. Calculando as correlações de cada imagem tomada com a primeira, verificamos se elas não apresentam alterações ao longo do tempo que possam prejudicar os resultados da medição de CAS.

### 6.2.3 Tomada de Dados

Verificada a estabilidade do padrão de *speckle*, registramos a imagem inicial a ser utilizada como referência na medição. Em seguida, usando o parafuso de movimentação da escala angular, giramos a amostra de um pequeno incremento (o  $\delta\theta$  da equação 5.24) da ordem de  $10'$  (para amostras de rugosidade maior) a  $60'$  (para amostras de rugosidade muito baixa). Com o parafuso do braço móvel deslocamos a câmara CCD de um incremento igual ao dobro do usado para a amostra, de modo que temos novamente a mesma região do padrão de *speckle* sobre o sensor, apenas com as modificações devidas às alterações de caminhos ópticos mencionadas na seção 5.1. Esta nova imagem é registrada e calculamos a correlação

entre ela e a imagem de referência. Assim temos as coordenadas (o deslocamento angular em relação à posição inicial é a abcissa e o valor de correlação é a ordenada) do primeiro ponto experimental a ser plotado em um gráfico.

Aplicando novo incremento angular à amostra, deslocando correspondentemente o braço móvel, digitalizando outra imagem e calculando sua correlação com a imagem de referência obtemos as coordenadas do segundo ponto experimental. E assim repetimos o processo até obtermos os pontos adequados para o ajuste da curva teórica.

#### 6.2.4 Tratamento dos Dados

De posse das coordenadas de todos os pontos experimentais aplicamos o método de mínimos quadrados (através do programa Origin) para ajustar a eles uma curva que obedeça à equação 5.24. Neste ajuste apenas o desvio padrão da distribuição de alturas da superfície (o termo  $\sigma$  da equação 5.24, equivalente à rugosidade quadrática média) funciona como parâmetro variável, uma vez que os demais estão determinados pelo experimento. Assim podemos dizer que a rugosidade da superfície medida é aquela que resulta no melhor ajuste da expressão teórica aos dados experimentais.

Os valores dos parâmetros fixos determinados pelo experimento, em nosso caso, são os seguintes:

- $\theta$  = ângulo de incidência inicial =  $22,5^\circ = 0,3927\text{rad}$ .
- $k$  = número de onda da radiação incidente (laser vermelho de HeNe) =  $2\pi/\lambda = 2\pi/0,6328\mu\text{m} = 9,929\mu\text{m}^{-1}$ .

Como deixamos o valor de  $k$  em unidades de  $\mu\text{m}^{-1}$ , obtemos após o ajuste o valor de  $\sigma$  em unidades de  $\mu\text{m}$ .



## 6.2.5 Aperfeiçoamentos Feitos

**Alinhamentos preliminares.** Adotamos a prática de ensaiar os movimentos de rotação da mesa central e do braço móvel ao longo de toda a circunferência antes de realizar a medição. Ao fazê-lo, temos o espelho no porta-amostras e a câmara *CCD* no braço móvel. Neste movimento checamos a incidência do feixe refletido no centro da câmara *CCD* em diversas posições, evitando deslocamentos verticais da imagem do padrão de *speckle* durante a tomada dos dados, pois qualquer deslocamento contribui para uma diminuição da correlação, o que no ajuste da curva teórica conduziria a um valor de rugosidade mais elevado que o correto.

Ao prepararmos os movimentos de rotação da amostra e do braço móvel, tomamos o cuidado de eliminar eventuais folgas nas roscas dos parafusos de deslocamento angular fino. Conseguimos isto girando sempre os parafusos no mesmo sentido de avanço que será usado durante a realização da medição, com o propósito de evitar deslocamentos laterais da imagem do padrão de *speckle*, que também causariam diminuição indevida da correlação.

**Ajustes iniciais.** Na descrição acima mencionamos o controle da intensidade de modo que nenhum pixel da câmara *CCD* ficasse saturado. Fazíamos isto ajustando a posição dos polarizadores de modo que os pixels mais iluminados acusassem um valor acima de 250 mas abaixo de 255 na escala de tons de cinza. O ajuste dos polarizadores para atingir tal condição era bastante difícil, pois dependendo das condições experimentais uma variação mínima da posição de um polarizador provocava uma mudança muito grande de intensidade de iluminação. Notamos também que com as alterações dos padrões de *speckle* provocadas pelas mudanças de ângulo de incidência do feixe de *laser* durante as medições, um ajuste tão rigoroso perdia sentido: freqüentemente os tons de cinza dos pixels mais iluminados ficavam muito aquém de 255, o que significava perda em resolução de intensidades; outras vezes, vários pixels acabavam por ficar saturados, de modo que sua comparação com os de outras imagens deixava de ser correta.

Por conta destas constatações modificamos nosso critério. Passamos a ajustar os po-

larizadores de modo que o número de pixels com tons de cinza acima de 250 fosse entre 100 e 200. Além de simplificar o ajuste dos polarizadores, este novo critério não representa prejuízo à medição, pois os pixels saturados representam menos de 0,07% do total.

Introduzimos também o teste de estabilidade do padrão de *speckle* antes do início da medição. Para isto utilizamos o programa Pearson6 como se fôssemos realizar uma medição. Inicializamos o programa e carregamos no programa Global Lab, usado para a aquisição das imagens, rotinas escritas por Diogo Soga (Laboratório de Óptica do IFUSP) para que ele trabalhe adequadamente em conjunto com o Pearson6. Registramos uma imagem inicial de referência e o programa calcula sua correlação com a própria imagem, encontrando invariavelmente o valor 1. Ao invés de alterar o ângulo de incidência do feixe de *laser*, como faríamos durante uma medição de CAS, aguardamos um minuto (sem tocar na montagem experimental) e adquirimos uma nova imagem. O Pearson6 então calcula a correlação entre esta segunda imagem e a primeira. Como nada foi alterado, o segundo padrão de *speckle* deveria ser idêntico ao primeiro, de modo que este segundo cálculo de correlação também resultasse em 1. Isto, porém, não ocorre, devido a pequenas variações causadas, por exemplo, por ruído eletromagnético que ocorre durante a aquisição da imagem. Assim o segundo valor de correlação calculado é sempre inferior a 1. Depois de decorrido mais um minuto adquirimos mais uma imagem e realizamos novo cálculo de correlação desta com a primeira. Após bastante tempo de trabalho com a montagem adotamos um critério de estabilidade considerada satisfatória: consideramos um padrão estável quando as correlações de cinco imagens, adquiridas com intervalos de 1 minuto, com a imagem de referência oscilam entre 0,99 e 1.

**Tomada de dados.** No início do trabalho utilizávamos para registro das imagens e cálculo das correlações entre elas um programa de computador que utilizava apenas uma linha ou uma média de um conjunto de linhas da imagem. Verificamos que assim tínhamos muita flutuação estatística dos valores de correlação. Por isto foi desenvolvido um novo programa (Pearson6), que utiliza todos os pixels ( $639 \times 479 = 306081$ ) no cálculo da correlação.

Para evitar introdução de erros na medição, sempre atentamos para o posicionamento



correto do padrão de *speckle* a cada incremento angular. Quando, apesar dos cuidados tomados, notamos algum deslocamento tendencioso entre uma imagem e a subsequente, realizamos ajustes manuais na posição da amostra e/ou da câmara CCD que o corrijam.

Quando começamos a trabalhar com o método, fazíamos questão de estender a medição até que obtivéssemos pontos experimentais com correlação nula. Com o tempo, notamos que basta chegar a um ponto em que a correlação calculada caia abaixo de 0,1, pois os pontos seguintes deixam de ter importância considerável para o ajuste da curva teórica.

Devido a características do goniômetro que usamos em nossa montagem experimental, para fazer o deslocamento angular da amostra precisamos mover a escalar graduada, nossa referência de posição. Nossas tentativas de fazê-lo sem mover a escala foram frustradas, pois sempre resultaram em posicionamento incorreto do padrão de *speckle* sobre a câmara CCD. Mas o deslocamento da escala graduada conduz a um duplo problema: primeiro, temos acúmulo dos erros de posicionamento ao longo da medição; segundo, estamos sujeitos a tomar uma posição inicial errada, quando, ao final de uma medição, retornamos à posição inicial e vamos fazer nova medida. O primeiro problema persiste até nossas medições atuais, mas adotamos uma prática que visa minimizar o segundo. Para assegurar o correto retorno à posição inicial, passamos a utilizar a imagem do padrão de *speckle* registrada no início da medição (este é um dos motivos pelos quais salvamos uma cópia desta imagem). Pela comparação da imagem obtida pela câmara CCD após o retorno do equipamento à posição inicial com a imagem registrada no início podemos detectar erros de posicionamento. Caso haja algum deslocamento entre as imagens, realizamos pequenas correções nas posições de amostra e CCD até que as imagens coincidam e a escala angular indique corretamente a posição inicial ( $315^\circ$ ).

**Tratamento dos dados.** Apesar de a própria formação do padrão de *speckle* ser um processo estatístico e determinarmos a rugosidade através de um processo também estatístico de ajuste de uma curva teórica por vários pontos experimentais, quando é viável e julgamos necessário, trabalhamos com médias de várias (por exemplo, cinco) tomadas de dados.

# Capítulo 7

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 7.1 Primeiras Medições

Em nosso primeiro contato com a técnica de CAS, a proposta era de resolver os problemas de instabilidade do padrão de *speckle* obtido com a montagem existente à época no Laboratório de Óptica do Instituto de Física. Este trabalho está brevemente descrito na subseção 6.1.1.

Depois de tratado o problema de instabilidade começamos a realizar ensaios de medições utilizando uma amostra supostamente bem conhecida, para que pudéssemos verificar se os resultados obtidos eram razoáveis. A amostra escolhida foi um pequeno paralelepípedo de latão, de 23mm x 23mm x 8mm, que tinha uma das faces esmerilhada, e cuja rugosidade, medida por um perfilômetro mecânico indicava o valor de  $R_a = 4,5\mu m$ .

Procuramos verificar então se os valores de rugosidade de uma superfície obtidos com a medição por CAS seriam semelhantes aos valores de  $R_q$  encontrados em sua medição com um rugosímetro convencional. Assim, baseados no pressuposto bastante difundido de que o esmerilhamento produz uma superfície com distribuição Gaussiana de alturas (veja, por exemplo, Rebollo (1995) [5]), utilizamos a eq. 2.5 para determinar o valor de  $\sigma$  de uma curva teórica (eq. 5.21) que deveria estar muito próxima dos valores experimentais que obtivéssemos com a amostra mencionada.



Todavia os resultados obtidos ficaram muito acima desta curva teórica, como mostra a fig. 7.1.

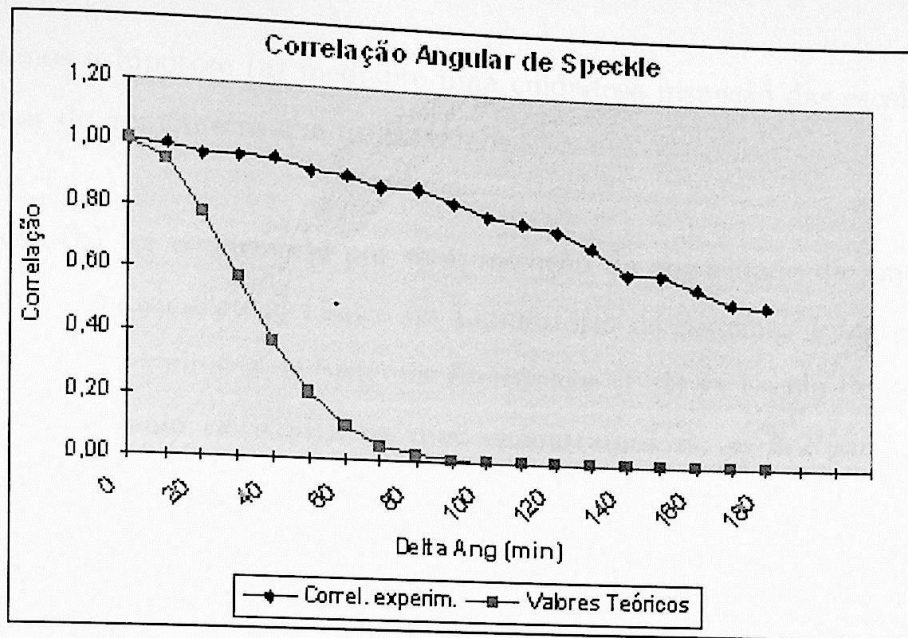


Figura 7.1: Gráfico da correlação angular de *speckle* medida para amostra de latão esmerilhada. Os valores teóricos foram obtidos através da eq. 5.21, com utilização do valor  $\sigma = 5,625\mu m$ .

Procuramos formular algumas hipóteses para explicar essa discrepância nos dados. A primeira idéia que tivemos foi, naturalmente, procurar algum erro experimental. Mas havia aí um grande problema: uma correlação entre padrões de *speckle* mais elevada que a prevista indicava figuras mais semelhantes que o esperado. Ora, erros experimentais corriqueiros (imprecisão de posicionamento ou de deslocamento, por exemplo) poderiam prejudicar a coincidência dos padrões de *speckle*, causando uma queda da correlação, mas jamais sua elevação!

Diante disto, passamos a considerar três outras hipóteses:

- (a) o deslocamento angular que estávamos utilizando poderia ser muito menor que imaginávamos;

- (b) o valor da rugosidade que havíamos adotado para a amostra (e que utilizávamos no cálculo teórico dos valores de correlação) poderia ser muito maior que o verdadeiro;
- (c) poderia haver algum erro no cálculo teórico da correlação angular.

Descartamos a hipótese (a) mediante uma cuidadosa inspeção das escalas de deslocamento angular do goniômetro que utilizávamos.

A hipótese (b) foi confirmada por uma medição da rugosidade da amostra que realizamos em um rugosímetro mecânico do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI), do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), na qual encontramos  $R_a = 2,25\mu m$ . Este erro, no entanto, não bastava para justificar a diferença. Mesmo refazendo os cálculos com o novo valor, obtínhamos resultados muito inferiores aos encontrados experimentalmente.

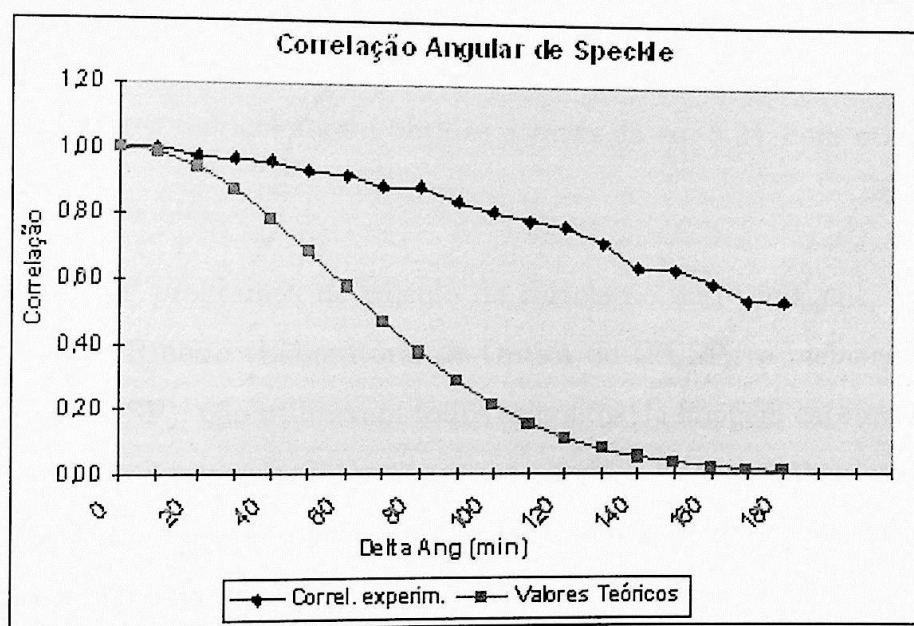


Figura 7.2: Gráfico da correlação angular de *speckle* medida para amostra de latão esmerilhada. Os valores teóricos foram obtidos através da eq. 5.21, com utilização do valor  $\sigma = 2,8125\mu m$ .

Por fim, considerando a hipótese (c) foi que empreendemos uma revisão cuidadosa do



trabalho de Rebollo (1995) [5], referência para o desenvolvimento de nosso trabalho, a qual nos conduziu à correção apresentada na subseção 5.2.3. A partir de então deixamos de usar a eq. 5.21 e passamos a trabalhar com a eq. 5.24.

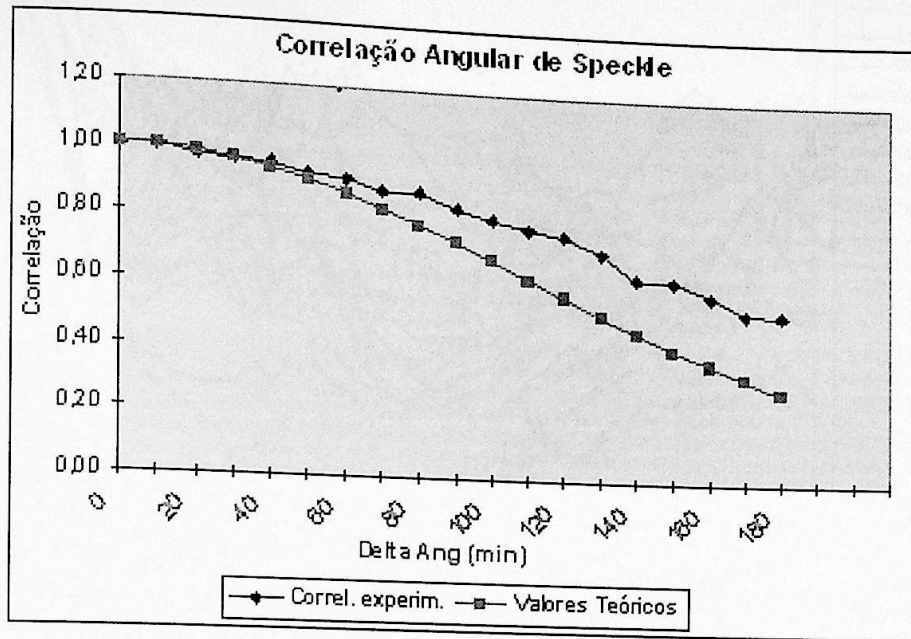


Figura 7.3: Gráfico da correlação angular de *speckle* medida para amostra de latão esmerilhada. Os valores teóricos foram obtidos através da eq. 5.24, com utilização do valor  $\sigma = 2,8125\mu m$ .

Nossos primeiros programas de cálculo de correlação entre imagens, construídos por José Alberto Lima Ribeiro (Laboratório de Óptica do IFUSP, *in memoriam*) e Akiyoshi Mizukami (FATEC-SP), não utilizavam todos os pontos da imagem capturada pela câmara CCD para o cálculo da correlação, mas apenas algumas de suas linhas ou outras porções da imagem. Este procedimento levava a resultados que apresentavam enormes oscilações, como mostra o gráfico da fig. 7.4.

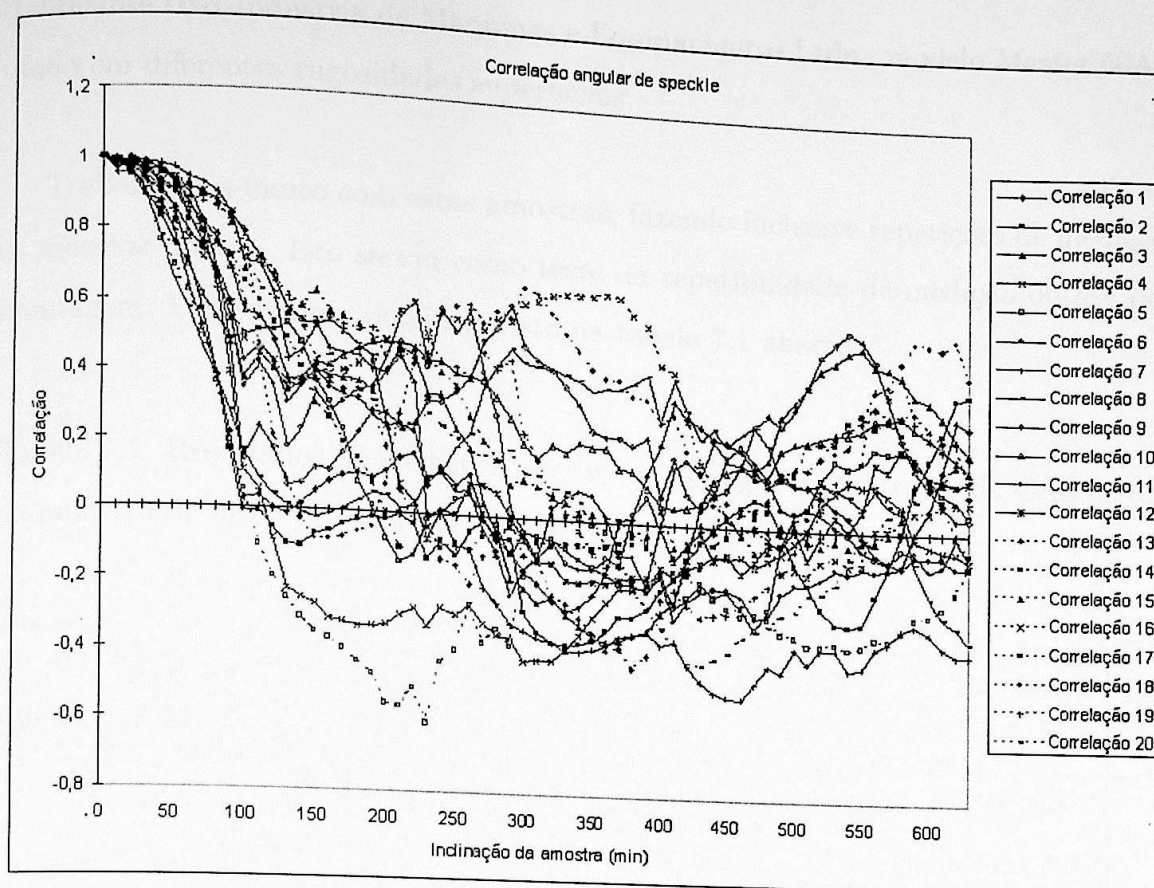


Figura 7.4: Gráficos das correlações angulares de *speckle* calculadas sobre 20 porções diferentes da mesma seqüência de imagens.

O Prof. Mitsuo Takeda, da University of Electro-Communications (Japão), sugeriu que o aumento da amostragem dos dados, tomando uma parte maior das imagens para realizar o cálculo das correlações, poderia amenizar este problema. Então, com a contribuição de Diogo Soga e Felix Claret da Silva (Laboratório de Óptica do IFUSP) foi elaborado um novo programa, Pearson6, que permite a comparação de todos os pontos das imagens (640 x 480 pixels).

## 7.2 Testes de repetibilidade

Com o objetivo de testar nossa montagem e adquirir mais prática em seu uso, preparamos amostras de latão usinadas por eletro-erosão para medirmos suas rugosidades através da CAS. Cada amostra foi preparada com um valor diferente de corrente aplicado pela máquina



(fabricante IBH Indústria de Máquinas e Equipamentos Ltda., modelo Master 50A), resultando em diferentes rugosidades superficiais.

Trabalhamos muito com estas amostras, fazendo inclusive repetições de medições sobre os mesmos pontos. Isto serviu como teste da repetibilidade de medição obtida por nossa montagem. Um exemplo pode ser visto na tabela 7.1 abaixo.

Tabela 7.1: Resultados de medições repetitivas de rugosidade através da CAS de um ponto da amostra de latão usinada por eletro-erosão n° 4.

Incl. da amostra [min]	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Desv. Padrão
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0
10	0.838474	0.853518	0.863223	0.854806	0.829310	0,0557
20	0.660325	0.655260	0.674492	0.633003	0.639776	0,0286
30	0.425470	0.407622	0.403161	0.402505	0.450027	0,0117
40	0.266433	0.224366	0.222801	0.270365	0.276745	0,0118
50	0.150796	0.139872	0.157037	0.159549	0.169031	0,0111
60	0.096665	0.093050	0.099830	0.095823	0.098046	0,0087
70	0.046476	0.060669	0.051446	0.051560	0.045163	0,0039
80	0.020303	0.034992	0.023880	0.016374	0.007230	0,0028
90	0.015299	0.023575	0.007857	0.009404	0.002454	0,0032
Rugos. [ $\mu\text{m}$ ]	13,4	13,8	13,7	13,6	13,2	0,2154

### 7.3 Estudo de Modelo de Corrosão

Realizamos um outro trabalho em que foi possível a utilização desta técnica de correlação. Foi uma pesquisa conjunta com a participação do Prof. Néstor Gustavo Gaggioli (CNEA - Argentina) para o estudo do processo de corrosão ("pitting corrosion").

Preparamos amostras especialmente para este fim, com diferentes tempos e diversas correntes de aplicação de eletro-erosão, de modo a simular variados graus de corrosão.

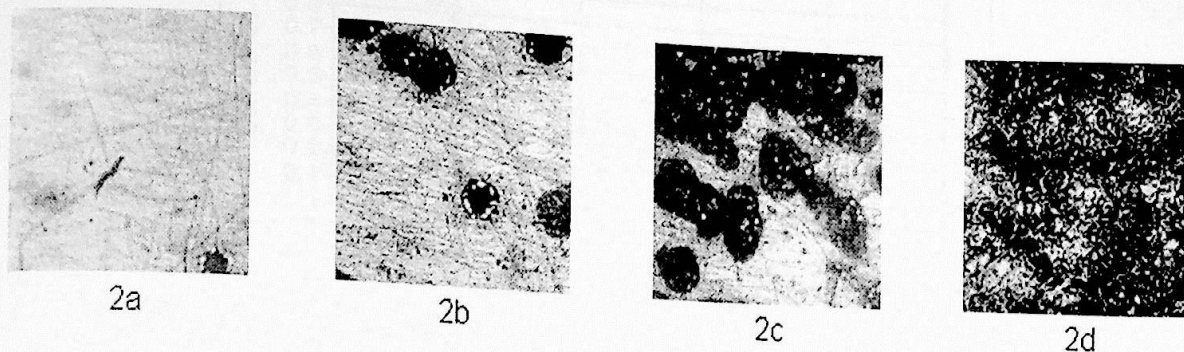


Figura 7.5: Fotos de amostras obtidas por eletro-erosão com diferentes graus de corrosão. 2a: 1%; 2b: 10%; 2c: 60%; 2d: 100%.

Medindo-as através da CAS pudemos mostrar que com o aumento do grau de corrosão das superfícies havia um aumento de suas rugosidades.

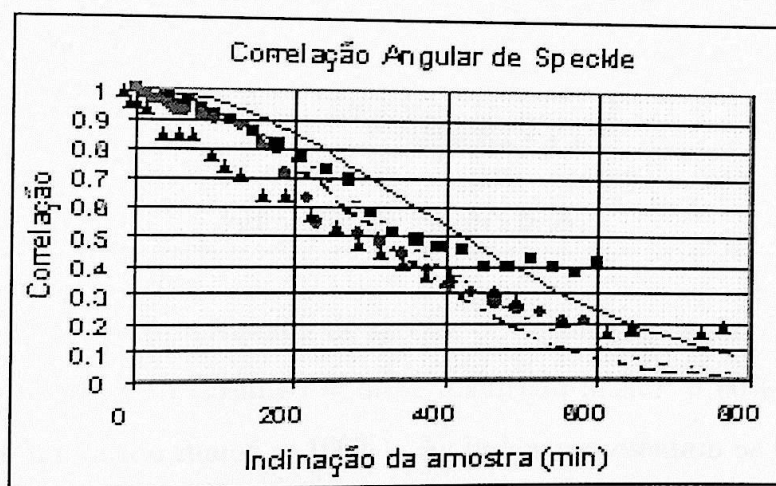


Figura 7.6: Correlação de intensidades de *speckle* vs. inclinação da amostra para superfícies com 0 a 5% de corrosão (quadrado = 0%, círculo = 1% e triângulo = 5%). As linhas representam as curvas teóricas que melhor aproximam os pontos experimentais.



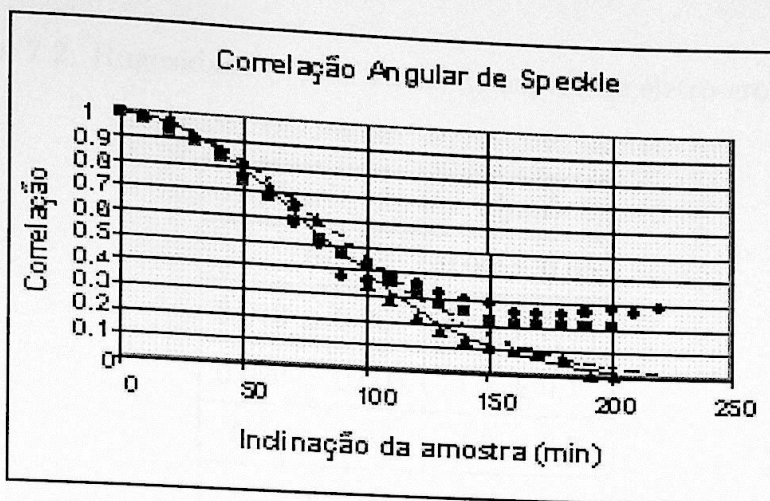


Figura 7.7: Correlação de intensidades de *speckle* vs. inclinação da amostra para superfícies com 10 a 40% de corrosão (círculo = 10%, quadrado = 20% e triângulo = 40%). As linhas representam as curvas teóricas que melhor aproximam os pontos experimentais.

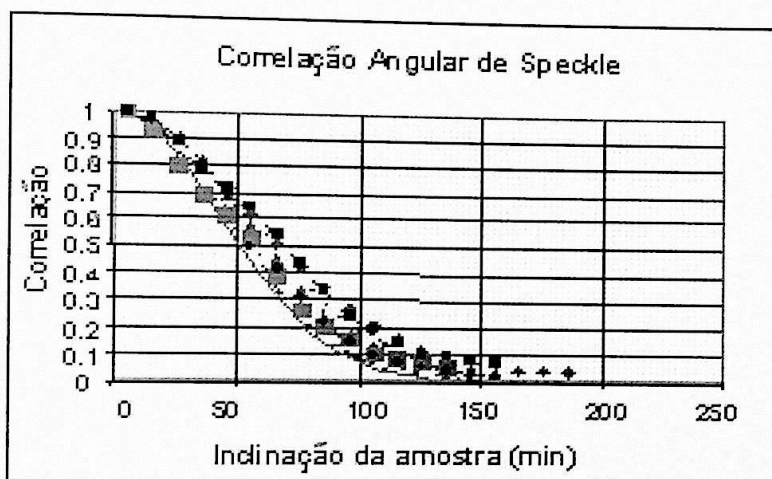


Figura 7.8: Correlação de intensidades de *speckle* vs. inclinação da amostra para superfícies com 50 a 100% de corrosão (losango = 50%, quadrado menor = 60%, triângulo = 80%, círculo = 100% e quadrado maior = 100%). As linhas representam as curvas teóricas que melhor aproximam os pontos experimentais.

Os valores do parâmetro  $\sigma$  (desvio padrão das alturas) obtidos pelo ajuste das curvas aos pontos experimentais nos gráficos acima estão na tabela 7.2.

Tabela 7.2: Rugosidade ( $\sigma$ ) vs. razão da superfície eletro-erodida ( $s$ ).

$s$	$\sigma [\mu m]$
0	$0,90 \pm 0,05$
$0,010 \pm 0,001$	$1,10 \pm 0,05$
$0,050 \pm 0,005$	$1,2 \pm 0,1$
$0,10 \pm 0,01$	$4,0 \pm 0,2$
$0,20 \pm 0,02$	$4,1 \pm 0,2$
$0,40 \pm 0,04$	$4,4 \pm 0,3$
$0,50 \pm 0,05$	$5,6 \pm 0,3$
$0,60 \pm 0,04$	$5,9 \pm 0,3$
$0,80 \pm 0,02$	$6,6 \pm 0,3$
1	$7,2 \pm 0,4$

Analisando os resultados obtidos foi possível propor um modelo para descrição da superfície [25], no qual a rugosidade da superfície como um todo é dada pela equação 7.1:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (1 - s)\sigma_1^2 + s\sigma_2^2 \quad (7.1)$$

na qual  $s$  é a razão entre a área eletro-erodida e a área total,  $\sigma_1$  é a rugosidade da área não erodida,  $\sigma_2$  é a rugosidade da área erodida e  $\sigma_0$  é dada por

$$\sigma_0 = 2h\sqrt{s(1 - s)} \quad (7.2)$$

onde  $2h$  é a profundidade das crateras erodidas.

A equação 7.1 pode ainda ser reescrita em termos de  $s$ , na forma

$$\sigma^2 = -4h^2s^2 + (4h^2 - \sigma_1^2 + \sigma_2^2)s + \sigma_1^2 \quad (7.3)$$

Usando os dados da tabela 7.2 obteve-se o gráfico abaixo.



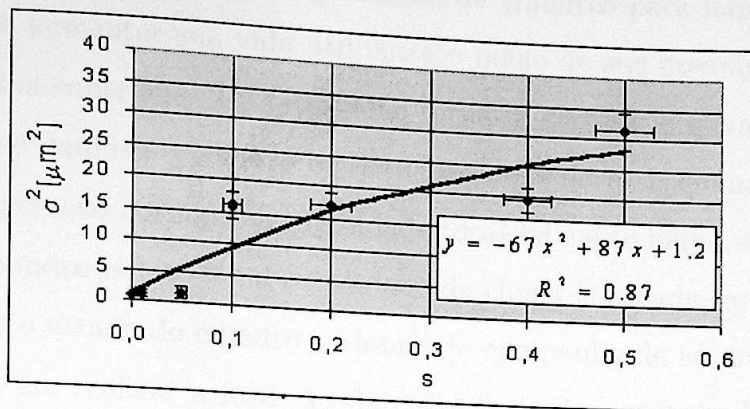


Figura 7.9: Rugosidade ao quadrado vs. fração da área eletro-erodida. Os losangos indicam os pontos experimentais e a linha indica a curva a eles ajustada.

Da parábola ajustada aos dados pode-se deduzir os parâmetros:

$$p = (8,2 \pm 0,5) \mu m$$

$$\sigma_1 = (1,1 \pm 0,1) \mu m \quad (7.4)$$

$$\sigma_2 = (4,6 \pm 2) \mu m$$

bastante razoáveis para ambas as rugosidades e a profundidade das crateras consideradas no modelo.

O conteúdo apresentado nesta seção ensejou a publicação de um artigo [25] na *Insight*, revista do *British Institute of Non-Destructive Testing*, no qual discutimos com maiores detalhes o modelo e os resultados mencionados acima.

## 7.4 Chapas de Aço Laminadas a Frio

Também utilizamos a medição de rugosidade por CAS em uma aplicação ligada à indústria. Foi num trabalho cooperativo entre nosso Laboratório de Óptica e o Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, coordenado pelo Prof. Amilton Sinatora. Seu grupo estava

envolvido em um projeto de aperfeiçoamento de cilindros para laminação a frio de tiras de aço, visando aumentar sua vida útil entre o início de sua operação e a necessidade de retrabalho de sua superfície. Tal retrabalho torna-se necessário quando há algum acidente na operação que danifica o cilindro ou, situação mais normal, quando devido ao desgaste causado pela operação normal sua rugosidade torna-se muito baixa. Como a rugosidade da superfície do cilindro reflete-se na rugosidade da chapa laminada, esta estava sendo usada para monitorar o estado do cilindro ao longo da campanha de laminação. Nosso trabalho então consistiu em realizar a medição da rugosidade de amostras de chapas colhidas em vários momentos destas campanhas de laminação.

Na laminação a frio ocorrem deformações na estrutura cristalina do metal, que tem seus grãos distorcidos e fragmentados. A superfície do material também é alterada e normalmente é perceptível a olho nu uma orientação que denuncia a direção de laminação. Sendo assim, as amostras laminadas com as quais trabalhamos afastavam-se substancialmente da hipótese utilizada no desenvolvimento teórico da CAS, segundo a qual as alturas da superfície espalhadora obedeceriam a uma função densidade de probabilidade gaussiana. Acreditamos que esta tenha sido a causa da divergência que pudemos observar entre alguns de nossos conjuntos de pontos experimentais e as curvas teóricas que melhor os ajustavam.

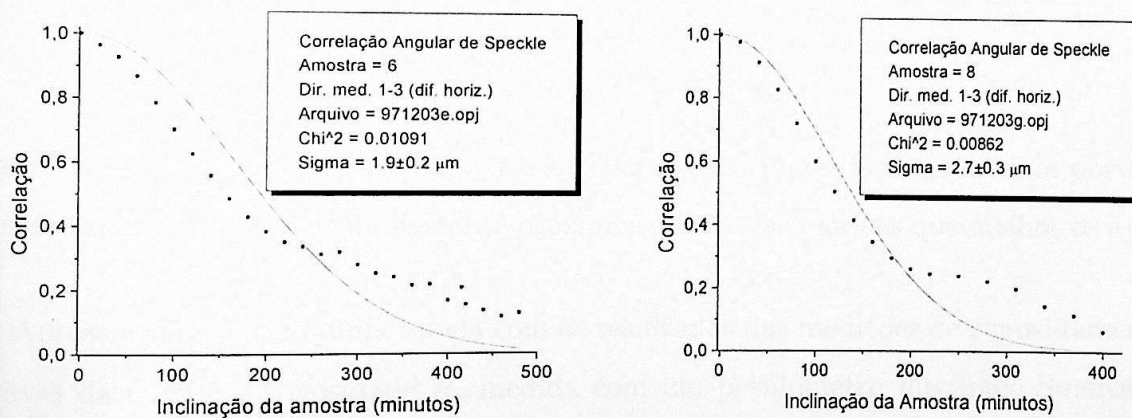


Figura 7.10: Para algumas das amostras de chapas cuja rugosidade foi medida por CAS os pontos experimentais não ficaram muito próximos das curvas teóricas que melhor os ajustam.



Observamos, em particular, uma diferença na luz espalhada pela superfície das amostras de chapas. Enquanto as amostras de superfícies mais homogêneas, com as quais havíamos trabalhado até então, produziam padrões de *speckle* de intensidade média razoavelmente uniforme, os padrões produzidos pelas chapas apresentavam uma região de intensidade média muito maior que o restante. Esta região mostrava-se alongada na direção perpendicular à direção de laminação, evidenciando o efeito similar ao de uma rede de difração, causado pelas marcas de laminação que mencionamos anteriormente. Para algumas das amostras o efeito era muito pronunciado, de forma que obtínhamos uma linha de maior intensidade do *speckle*, enquanto para outras poderíamos dizer que se formava uma região elíptica mais iluminada. Apesar disto, para algumas das amostras do mesmo lote, o ajuste dos pontos experimentais às curvas teóricas foi muito bom, como pode ser visto nos gráficos da fig. 7.11.

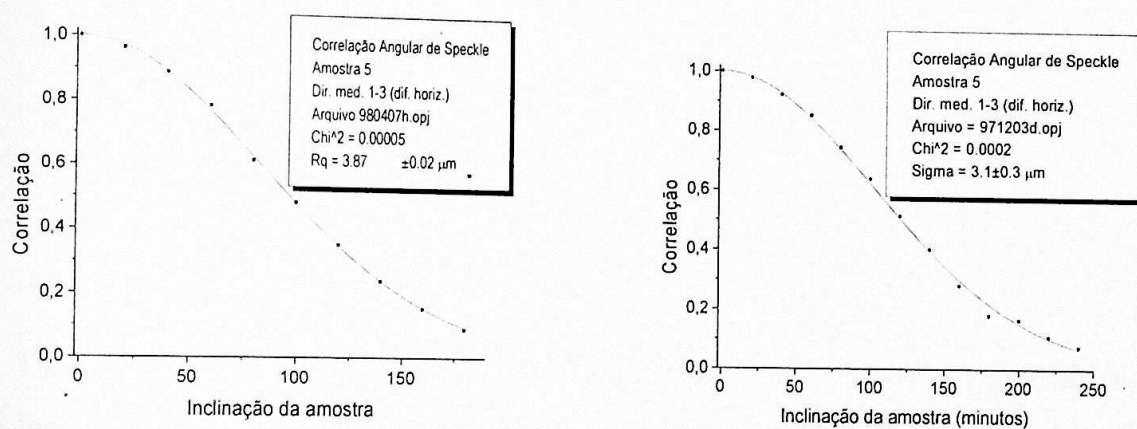


Figura 7.11: Para algumas das amostras de chapas cuja rugosidade foi medida por CAS os pontos experimentais ficaram bastante próximos das curvas teóricas que melhor os ajustam.

Apresentamos abaixo uma tabela com os resultados das medições de rugosidade obtidas através da CAS e a rugosidade  $R_q$  medida com um perfilômetro mecânico Surtronic 3+, da Rank Taylor Robson, para algumas das chapas laminadas.

Tabela 7.3: Resultados de medições de desvio padrão das alturas através da CAS e rugosidade  $R_q$  medida com perfilômetro mecânico, de algumas amostras de chapas laminadas a frio.

Número da amostra	Direção de medição	Resultado CAS [ $\mu m$ ]	$R_q$ [ $\mu m$ ]
4	transv.	$2,87 \pm 0,15$	$2,90 \pm 0,17$
	long.	$3,09 \pm 0,15$	$3,05 \pm 0,14$
5	transv.	$3,87 \pm 0,04$	$2,75 \pm 0,33$
	long.	$4,87 \pm 0,25$	$2,78 \pm 0,16$
6	transv.	$3,24 \pm 0,06$	$2,79 \pm 0,16$
	long.	$3,72 \pm 0,06$	$2,91 \pm 0,25$
7	transv.	$3,53 \pm 0,08$	$2,74 \pm 0,19$
	long.	$3,93 \pm 0,06$	$2,96 \pm 0,30$
8	transv.	$2,84 \pm 0,17$	$2,68 \pm 0,22$
	long.	$3,18 \pm 0,15$	$2,72 \pm 0,15$
9	transv.	$3,56 \pm 0,11$	$2,60 \pm 0,21$
	long.	$3,64 \pm 0,09$	$2,87 \pm 0,21$

Os resultados mostraram que a rugosidade não sofreu variação significativa com a evolução da campanha do cilindro. Verificou-se que os diferentes métodos de medida de rugosidade apresentaram a mesma tendência com o estágio de campanha do cilindro.

## 7.5 Superfície Dental

Desenvolvemos um trabalho em parceria com pesquisadores da Faculdade de Odontologia da USP, cujo objetivo era medir a rugosidade das superfícies de dentes humanos. Embora este trabalho não tenha prosseguido devido a dificuldades encontradas em sua realização, consideramos pertinente relatar algo sobre ele, pois durante seu desenvolvimento tivemos oportunidade de adquirir mais alguns conhecimentos sobre a técnica da CAS e,



principalmente, de suas limitações:

No trabalho de remoção de cálculos dentais (tártaro) é comum a prática de se realizar uma raspagem da superfície do dente. É importante, porém, observar que tal operação pode resultar em uma superfície mais rugosa que a inicial, o que facilita a adesão e a estagnação de bactérias. Estas, por sua vez, formam a placa bacteriana, principal causa do início e do desenvolvimento de doenças periodontais. Tais eram as considerações que motivavam o estudo da rugosidade da superfície de dentes humanos, com objetivo de comparar os efeitos de diversas técnicas e ferramentas de remoção de cálculos dentais, a fim de determinar quais seriam menos prejudiciais à saúde bucal. Anteriormente haviam sido realizados alguns ensaios de medição desta rugosidade com perfilômetro mecânico, mas a observação posterior das amostras ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) revelou que tais medições formavam sulcos na superfície, o que lançava dúvidas sobre a validade dos valores encontrados.

A primeira dificuldade com que nos deparamos foi como fixar os dentes a serem medidos no porta-amostras de nossa montagem experimental. A primeira solução tentada foi montar as amostras em blocos de resina. Mais tarde viríamos a colá-las em bases metálicas, para as quais fabricamos um suporte especial que podia ser adaptado a nosso goniômetro.

A teoria em que nossa técnica se baseia foi desenvolvida sobre a premissa de superfícies espalhadoras planas. Amostras de dentes, no entanto, apresentam superfícies curvas. Como não havíamos estudado o efeito que a curvatura da superfície poderia causar sobre a correlação angular de *speckle*, decidimos tentar minimizá-lo, fazendo o feixe de *laser* incidir sobre as partes mais planas que encontrássemos nas regiões de interesse das amostras.

Quando iniciamos a primeira tentativa de medição da CAS com um dente, demos conta de um outro grave problema. Sempre havíamos pensado em dentes como objetos opacos. Na realidade, porém, trata-se de um objeto translúcido, ou seja, cuja superfície permite a passagem de parte da luz incidente, espalhando-a. Isto fazia com que, ao invés de um padrão de *speckle* associado apenas à superfície, tivéssemos luz do interior do dente participando das interferências luminosas para formar a figura. Naturalmente, com tal

mistura de informações não poderíamos obter a rugosidade da superfície. Para contornar esta dificuldade passamos a trabalhar com amostras submetidas a uma metalização prévia com uma fina camada de ouro.

A metalização das amostras, no entanto, não significou o fim dos problemas nas medições. Ocorria que ao colocarmos os dentes sob o *laser* não obtínhamos um padrão de *speckle* estável, senão depois de um longo período de espera, freqüentemente de mais de três horas. Verificamos se as mudanças não seriam causadas por alguma falha na fixação das amostras, mas nada encontramos. Quando colocávamos uma peça metálica no mesmo suporte obtínhamos imediatamente um padrão de *speckle* estável. Assim fomos levados à conclusão de que o problema estava mesmo nas amostras de dentes. Embora fossem dentes extraídos havia muitos meses, não descartamos a possibilidade de que abrigassem alguma atividade biológica microorgânica. Mas uma outra hipótese nos parece ser a explicação da dificuldade. O esmalte dental apresenta certa porosidade e é higroscópico (absorve umidade do ar). A incidência do feixe de *laser*, ainda que de potência baixa (da ordem de 10mW), leva a uma absorção capaz de provocar a evaporação das pequenas quantidades de água retidas no material, e enquanto isto ocorre o padrão de *speckle* não estabiliza. Este efeito tornou as medições demasiado demoradas, inviabilizando a continuidade do trabalho.

## 7.6 . Superfícies de Restaurações Dentais

As dificuldades surgidas na aplicação da CAS à medição da rugosidade da superfície dental não impediram que outras colaborações surgissem entre nosso laboratório e a Faculdade de Odontologia. Desta maneira desenvolvemos uma pesquisa conjunta com a Profa. Cláudia Maria Coêlho Alves, que resultou na sua tese de doutorado sobre a rugosidade da superfície de restaurações [26]. As motivações para esta pesquisa eram as mesmas citadas para o estudo da rugosidade de superfícies dentais, mas neste caso tínhamos um controle melhor das amostras.

Em primeiro lugar, os materiais submetidos a medição seriam ligas metálicas (amálgamas),



de modo que poderíamos contar com uma excelente refletividade da superfície e boa estabilidade dos padrões de *speckle*. Em segundo lugar, as amostras seriam preparadas especialmente para as medições, de modo que poderiam ser feitas razoavelmente planas.

Apesar disto, durante muito tempo tivemos de conviver com longas esperas para o início das medições, pois por algum motivo que então ignorávamos estas amostras também demoravam a proporcionar um padrão de *speckle* estável. Após grandes esforços para descobrirmos no experimento a causa da movimentação dos grãos de *speckle*, por sugestão do Prof. Matsuyoshi Mori (Faculdade de Odontologia da USP) os condensados de ligas foram preparados em furos feitos sobre uma placa de acrílico, ao invés de fazê-lo em blocos de resina. Estas novas amostras passaram a fornecer padrões de *speckle* estáveis em tempos muito menores, evidenciando que o problema era causado por acomodações da resina, das quais o acrílico estava isento.

Além do tempo consumido com as dificuldades descritas acima, outros fatores fizeram com que este trabalho se estendesse por longo período. A pesquisa desenvolvida pela Profa. Claudia requeria a medição de grande número de amostras, como é comum acontecer em trabalhos ligados às áreas de ciências biológicas. Por isso, realizamos mais de 240 medições com suas amostras. Em grande parte destas medições os valores de rugosidade encontrados eram baixos, o que nos obrigava a levar as medições até inclinações bastante grandes das amostras, tornando-as mais demoradas.

As medições buscaram comparar a rugosidade resultante do uso de algumas ligas e de alguns tratamentos para acabamento das superfícies distintos. Foram comparadas três ligas de prata para amálgama, listadas na tab. 7.4.

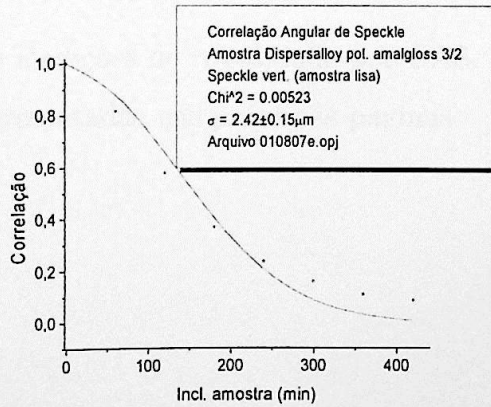
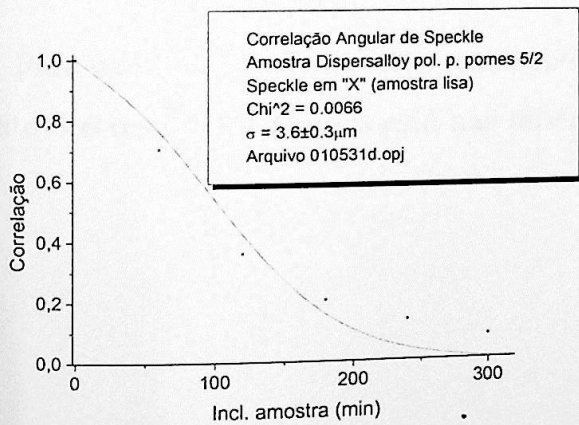
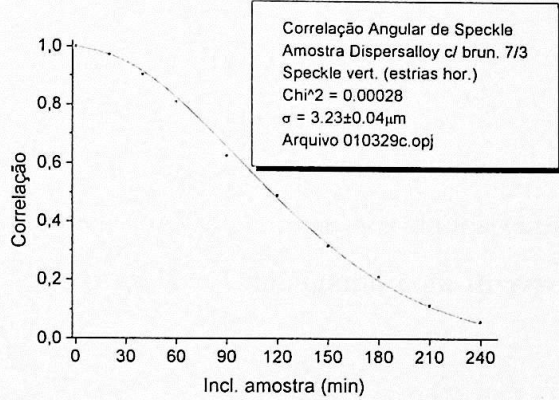
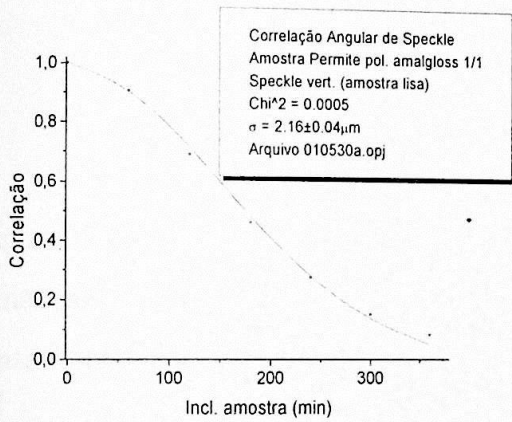
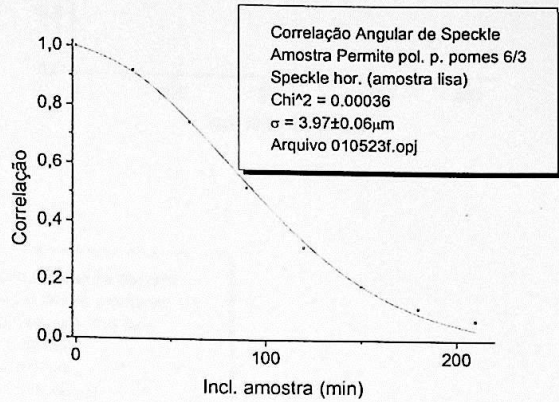
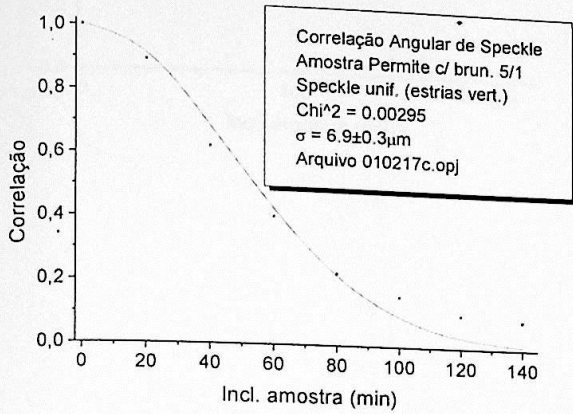
Tabela 7.4: Ligas para amálgama utilizadas no trabalho.

Material	Tipo	No. do lote	Fabricante	Composição
Dispersalloy	liga do tipo mistura	990426	Dentsply-Caulk	Ag, Sn, Cu, Zn
Permite C	liga do tipo mistura	000418301	Southern Dental Industries (SDI), Melbourne, Australia	Ag, Cu, Zn, Sn, In
GS 80	liga do tipo mistura	990908301	Southern Dental Industries (SDI), Melbourne, Australia	Ag, Sn, Cu, Zn

Cada um dos corpos de prova foi amalgamado ("misturado"), condensado em um furo de 5mm de diâmetro por 3mm de profundidade preparado na placa de acrílico, esculpido e brunido. Para as amostras de controle este foi o final da preparação. Um segundo grupo de amostras (de cada uma das ligas) foi submetido, 24h após a preparação, a polimento com Amalgloss (Dentsply). Finalmente um terceiro grupo (também para cada uma das ligas) foi submetido, também 24h após a preparação, a polimento com pasta fina de pedra pomes (PASOM - Indústria e Comércio de Materiais Restauradores).



Apresentamos a título de ilustração alguns dos gráficos de ajuste das curvas teóricas aos dados experimentais referentes a este trabalho.



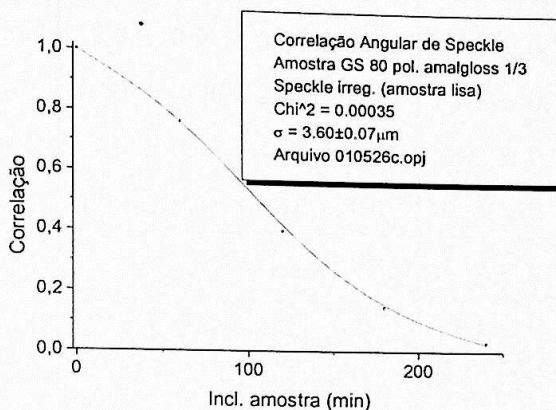
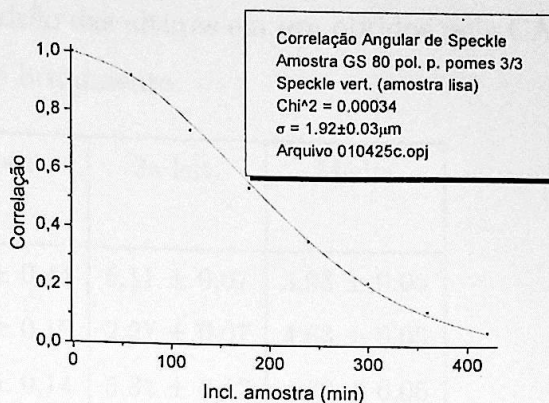
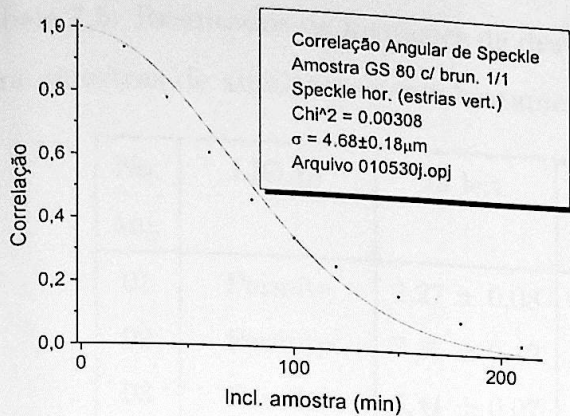


Figura 7.12: Estes são alguns dos gráficos de ajuste de curvas teóricas aos dados experimentais de CAS obtidos para amostras de ligas de prata para amálgama com diversos tratamentos de superfície.

Para cada uma das amostras realizamos três medições de rugosidade por CAS. O conjunto dos resultados obtidos está nas tabelas apresentadas nas próximas páginas.



Tabela 7.5: Resultados de medições de desvio padrão das alturas em  $\mu m$  obtidos pela CAS para amostras de amálgamas com tratamento de brunimento.

No. am.	LIGAS	1a leit.	2a leit.	3a leit.	Média
01	Permite	2,27 ± 0,08	7,51 ± 0,44	5,11 ± 0,07	3,93 ± 0,05
02	Permite	7,35 ± 0,12	7,55 ± 0,10	2,27 ± 0,07	4,63 ± 0,05
03	Permite	4,41 ± 0,07	4,94 ± 0,14	5,31 ± 0,12	4,69 ± 0,06
04	Permite	5,80 ± 0,15	5,57 ± 0,20	3,36 ± 0,10	4,33 ± 0,08
05	Permite	6,9 ± 0,3	4,7 ± 0,2	8,9 ± 0,2	6,82 ± 0,13
06	Permite	2,9 ± 0,2	3,35 ± 0,25	2,3 ± 0,2	2,78 ± 0,12
07	Permite	1,60 ± 0,06	2,31 ± 0,14	3,31 ± 0,15	1,90 ± 0,05
08	Permite	7,6 ± 0,5	4,58 ± 0,16	8,9 ± 0,2	6,34 ± 0,12
09	Permite	4,99 ± 0,11	8,76 ± 0,16	4,36 ± 0,17	5,79 ± 0,08
01	Dispersalloy	5,79 ± 0,03	3,7 ± 0,1	3,46 ± 0,07	5,20 ± 0,03
02	Dispersalloy	4,89 ± 0,14	2,9 ± 0,2	7,04 ± 0,15	5,27 ± 0,09
03	Dispersalloy	3,85 ± 0,08	4,35 ± 0,24	6,22 ± 0,09	4,86 ± 0,06
04	Dispersalloy	4,78 ± 0,13	5,29 ± 0,08	2,73 ± 0,03	3,12 ± 0,03
05	Dispersalloy	2,90 ± 0,17	4,77 ± 0,06	4,01 ± 0,19	4,52 ± 0,05
06	Dispersalloy	3,64 ± 0,11	4,60 ± 0,08	5,66 ± 0,08	4,82 ± 0,05
07	Dispersalloy	5,52 ± 0,17	6,16 ± 0,13	3,23 ± 0,04	3,58 ± 0,04
08	Dispersalloy	4,76 ± 0,06	5,08 ± 0,04	3,80 ± 0,11	4,88 ± 0,03
09	Dispersalloy	5,70 ± 0,17	5,37 ± 0,10	4,25 ± 0,06	4,64 ± 0,05
01	GS80	4,68 ± 0,18	5,89 ± 0,04	4,7 ± 0,3	5,81 ± 0,04
02	GS80	13,2 ± 1,4	8,61 ± 0,19	8,3 ± 0,2	8,51 ± 0,14
03	GS80	4,3 ± 0,2	4,08 ± 0,03	3,5 ± 0,2	4,07 ± 0,03
04	GS80	7,0 ± 0,4	5,3 ± 0,2	5,11 ± 0,10	5,24 ± 0,09
05	GS80	6,20 ± 0,17	9,43 ± 0,15	7,2 ± 0,2	7,82 ± 0,10
06	GS80	4,60 ± 0,06	3,58 ± 0,11	5,06 ± 0,18	4,42 ± 0,05
07	GS80	4,80 ± 0,07	5,44 ± 0,03	8,69 ± 0,06	5,92 ± 0,03
08	GS80	5,5 ± 0,3	4,30 ± 0,16	7,50 ± 0,07	6,92 ± 0,06
09	GS80	4,54 ± 0,07	4,48 ± 0,06	5,42 ± 0,14	4,59 ± 0,04

Tabela 7.6: Resultados de medições de desvio padrão das alturas em  $\mu m$  obtidos pela CAS para amostras de amálgamas com tratamento de brunimento seguido de polimento com pedra pomes.

No. am.	LIGAS	1a leit.	2a leit.	3a leit.	Média
01	Permite	4,29 ± 0,08	2,09 ± 0,11	2,33 ± 0,05	2,78 ± 0,04
02	Permite	2,15 ± 0,07	2,21 ± 0,07	1,26 ± 0,03	1,51 ± 0,03
03	Permite	1,97 ± 0,18	1,52 ± 0,07	2,12 ± 0,14	1,68 ± 0,06
04	Permite	2,25 ± 0,12	1,92 ± 0,06	2,14 ± 0,13	2,01 ± 0,05
05	Permite	1,31 ± 0,04	1,21 ± 0,05	1,50 ± 0,06	1,32 ± 0,03
06	Permite	3,0 ± 0,3	2,11 ± 0,04	3,97 ± 0,06	2,69 ± 0,03
07	Permite	1,53 ± 0,02	1,325 ± 0,017	1,99 ± 0,14	1,416 ± 0,013
08	Permite	3,2 ± 0,2	3,5 ± 0,3	1,71 ± 0,07	1,95 ± 0,06
09	Permite	1,41 ± 0,08	1,65 ± 0,07	1,20 ± 0,07	1,42 ± 0,04
01	Dispesalloy	4,4 ± 0,4	8,45 ± 0,19	7,5 ± 0,5	7,68 ± 0,16
02	Dispesalloy	5,84 ± 0,14	4,67 ± 0,06	3,87 ± 0,03	4,09 ± 0,03
03	Dispesalloy	3,95 ± 0,09	4,70 ± 0,21	4,15 ± 0,17	4,08 ± 0,07
04	Dispesalloy	2,32 ± 0,10	4,20 ± 0,22	2,02 ± 0,07	2,25 ± 0,06
05	Dispesalloy	2,31 ± 0,07	3,6 ± 0,3	1,66 ± 0,05	1,91 ± 0,04
06	Dispesalloy	3,38 ± 0,16	4,2 ± 0,4	1,44 ± 0,02	1,48 ± 0,02
07	Dispesalloy	4,1 ± 0,2	10,06 ± 0,06	6,7 ± 0,2	9,35 ± 0,06
08	Dispesalloy	1,68 ± 0,09	2,42 ± 0,14	1,67 ± 0,08	1,79 ± 0,05
09	Dispesalloy	1,32 ± 0,19	2,02 ± 0,10	6,97 ± 0,16	3,06 ± 0,08
01	GS80	1,59 ± 0,06	1,79 ± 0,30	1,49 ± 0,05	1,54 ± 0,04
02	GS80	2,41 ± 0,14	1,42 ± 0,04	2,34 ± 0,09	1,63 ± 0,04
03	GS80	1,60 ± 0,02	1,19 ± 0,03	1,92 ± 0,03	1,579 ± 0,015
04	GS80	1,78 ± 0,03	3,26 ± 0,20	2,69 ± 0,10	1,88 ± 0,03
05	GS80	2,42 ± 0,10	4,59 ± 0,04	3,39 ± 0,16	4,24 ± 0,04
06	GS80	2,86 ± 0,10	3,31 ± 0,05	2,6 ± 0,4	3,21 ± 0,04
07	GS80	3,0 ± 0,2	5,69 ± 0,09	1,83 ± 0,09	3,69 ± 0,06
08	GS80	2,79 ± 0,12	5,49 ± 0,11	2,40 ± 0,09	3,43 ± 0,06
09	GS80	3,27 ± 0,14	3,47 ± 0,11	2,10 ± 0,07	2,61 ± 0,05



Tabela 7.7: Resultados de medições de desvio padrão das alturas em  $\mu m$  obtidos pela CAS para amostras de amálgamas com tratamento de brunimento seguido de polimento com Amalgloss.

No. am.	LIGAS	1a leit.	2a leit.	3a leit.	Média
01	Permite	2,16 ± 0,04	5,02 ± 0,16	3,53 ± 0,16	2,40 ± 0,04
02	Permite	6,1 ± 0,5	7,1 ± 0,2	5,75 ± 0,07	5,90 ± 0,07
03	Permite	1,54 ± 0,08	2,04 ± 0,15	5,4 ± 0,4	1,76 ± 0,07
04	Permite	2,17 ± 0,15	3,91 ± 0,15	3,18 ± 0,18	3,08 ± 0,09
05	Permite	1,32 ± 0,08	2,09 ± 0,05	4,70 ± 0,15	2,08 ± 0,04
06	Permite	2,83 ± 0,13	2,8 ± 0,2	5,79 ± 0,14	3,94 ± 0,09
07	Permite	2,40 ± 0,15	3,8 ± 0,2	2,67 ± 0,19	2,84 ± 0,10
08	Permite	1,69 ± 0,12	2,42 ± 0,12	3,1 ± 0,2	2,21 ± 0,08
09	Permite	5,4 ± 0,3	5,8 ± 0,2	4,8 ± 0,4	5,55 ± 0,15
01	Dispesalloy	3,9 ± 0,2	4,08 ± 0,08	2,89 ± 0,15	3,83 ± 0,07
02	Dispesalloy	3,1 ± 0,3	2,50 ± 0,11	1,16 ± 0,03	1,27 ± 0,03
03	Dispesalloy	2,28 ± 0,17	2,42 ± 0,15	2,63 ± 0,16	2,45 ± 0,09
04	Dispesalloy	3,59 ± 0,16	4,77 ± 0,13	4,40 ± 0,03	4,39 ± 0,03
05	Dispesalloy	4,75 ± 0,14	4,7 ± 0,3	2,49 ± 0,10	3,35 ± 0,08
06	Dispesalloy	3,7 ± 0,2	2,42 ± 0,14	2,60 ± 0,11	2,72 ± 0,08
07	Dispesalloy	2,89 ± 0,19	4,4 ± 0,3	4,08 ± 0,10	3,87 ± 0,08
08	Dispesalloy	1,98 ± 0,05	1,85 ± 0,13	2,57 ± 0,19	2,00 ± 0,05
09	Dispesalloy	2,52 ± 0,12	2,22 ± 0,17	1,38 ± 0,08	1,80 ± 0,06
01	GS80	1,61 ± 0,06	1,21 ± 0,05	3,60 ± 0,07	1,89 ± 0,03
02	GS80	1,49 ± 0,10	6,73 ± 0,15	5,6 ± 0,5	3,17 ± 0,08
03	GS80	1,24 ± 0,04	2,02 ± 0,16	5,29 ± 0,12	1,66 ± 0,04
04	GS80	3,38 ± 0,13	4,1 ± 0,4	0,85 ± 0,07	1,48 ± 0,06
05	GS80	3,2 ± 0,3	7,26 ± 0,15	5,99 ± 0,03	6,01 ± 0,03
06	GS80	5,19 ± 0,17	7,1 ± 0,5	1,56 ± 0,06	2,03 ± 0,06
07	GS80	4,9 ± 0,4	4,3 ± 0,4	3,7 ± 0,2	4,00 ± 0,16
08	GS80	1,44 ± 0,14	3,2 ± 0,3	3,4 ± 0,3	2,00 ± 0,12
09	GS80	3,5 ± 0,2	3,39 ± 0,18	2,66 ± 0,17	3,14 ± 0,11

A partir das coleções de dados contidas nas tabelas acima, foram obtidas médias e aplicados testes de Tukey, cujos resultados apresentamos abaixo.

Tabela 7.8: Médias dos resultados das diferentes ligas para amálgama e a probabilidade obtida pelo teste de Tukey ao nível de 95% de confiança. Não há diferença estatisticamente significativa entre as médias das ligas.

Amálgama	P	D	G
Médias	3,61	3,90	4,09
P		0,69	0,35
D			0,83

Tabela 7.9: Médias dos resultados dos diferentes tratamentos e a probabilidade obtida pelo teste de Tukey ao nível de 95% de confiança. A diferença de rugosidade do tratamento de brunimento (B) para os demais é estatisticamente significativa, mas não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dois outros tratamentos.

Tratamento	B	BP	BA
Médias	5,22	2,94	3,45
B		0,05*	0,05*
BP			0,32

Portanto, a análise estatística dos dados conduziu à conclusão de que o tipo de liga utilizada nas restaurações não influenciou na rugosidade resultante, mas o tratamento de superfície mostrou ser capaz de alterar a rugosidade superficial de forma acentuada.



# Capítulo 8

## CONCLUSÃO

### 8.1 Considerações Gerais

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho tivemos oportunidade de conhecer e aperfeiçoar uma técnica não destrutiva para medição da rugosidade de superfícies. Encontramos uma situação na qual existia uma montagem experimental que apresentava problemas e experimentamos as dificuldades com as quais se tem de lidar para resolvê-los. Acreditamos, ao final, haver chegado a uma situação que permite demonstrar as qualidades do método e suas potencialidades, além de identificar suas limitações.

A CAS mostrou ser uma técnica adequada para a medição de rugosidade (e corrosão) de uma grande gama de superfícies, e a variedade de situações nas quais a aplicamos permite afirmar que, através de mais algum aperfeiçoamento ela poderá tornar-se uma importante ferramenta para a caracterização da microtopografia para inúmeras aplicações.

No procedimento de medição da CAS, a superfície interage apenas com o feixe de *laser* que a atinge, o que faz com que não ocorram os riscos causados pelas medições realizadas com perfilômetros de agulha de diamante. Isto faz dela uma alternativa muito interessante nos casos em que o material a ser medido é susceptível a riscos, como ocorre no caso do esmalte dental que apresentamos na seção 7.5. Lembramos porém, que é necessário que o objeto a ser medido seja suficientemente opaco para a luz nele não penetre, caso contrário

a luz espalhada virá parte da superfície e parte do interior, inviabilizando a medição.

No estudo de modelo de corrosão (seq. 7.3) ficou demonstrada a possibilidade de se estender as aplicações da CAS além da simples caracterização de rugosidade, pois processos que envolvam alterações de superfícies podem ser monitoradas através delas. No exemplo citado a técnica mostrou ser capaz de detectar corrosões já a partir de 1% de área atingida.

Quando realizamos as medições de chapas laminadas (seq. 7.4), além do bom acordo com as medições realizadas através de perfilômetros mecânicos, constatamos que os padrões de speckle e os conjuntos de dados experimentais apresentaram características diferenciadas, inspirando a expectativa de obtenção de informações adicionais sobre as superfícies.

Finalmente o trabalho de medição da rugosidade de restaurações dentárias de ligas de amálgama (seq. 7.6) permitiram mostrar a viabilidade de se utilizar a CAS para comparação de diferentes materiais e tratamentos, inclusive em situações nas quais métodos convencionais de medição esbarrariam em certas dificuldades, como o pequeno tamanho das amostras, neste caso.

A maioria dos parâmetros de rugosidade habitualmente utilizados foram definidos a partir do perfil de rugosidade. Sendo assim, sua concepção já parte de uma descrição simplificada, pois uma superfície que é na realidade tridimensional passa a ser representada de forma bidimensional (através de alturas e distâncias que compõe o perfil) e a partir desta representação é que são calculados os parâmetros. Por isso, quando se pretende conseguir uma descrição mais completa, é necessário realizar uma série de medições, traçando perfis em pelo menos duas direções perpendiculares. No caso da CAS ocorre algo diferente. Como o próprio fenômeno da formação do *speckle* envolve as características tridimensionais da superfície espalhadora, uma única medição carrega informação de toda a região atingida pela luz coerente. Isto faz com que esta técnica possa ser utilizada com grande vantagem nos casos em que o interesse é a caracterização da superfície de maneira global. A ressalva importante é que, sendo uma medição estatística em sua essência, a CAS não se presta ao exame de detalhes da superfície.



Acreditamos que agora o grande desafio para que se estabeleça a utilidade prática do método seja sua utilização intensiva em variadas aplicações. Uma escala de medida de qualquer grandeza física somente ganha real significado quando as pessoas adquirem idéia intuitiva sobre ela. No momento não podemos dizer se uma rugosidade  $\sigma = 3\mu m$ , medida através da CAS, é adequada para a superfície de uma peça que deva, por exemplo, acumular lubrificante para diminuir o atrito em uma situação de deslizamento de outra peça sobre ela. Como entre escalas de rugosidade, não podemos fazer simples conversões, conforme argumentamos na seção 2.5, a única forma de dar significado às medidas obtidas pela CAS será passar a utilizá-las em diferentes situações (talvez funcionando inicialmente como mera escala comparativa entre superfícies) e a partir dos resultados obtidos estabelecer empiricamente faixas de valores adequados para cada aplicação. Certamente este tipo de trabalho também poderá nortear o estabelecimento de normas para procedimentos de medição da CAS.

## 8.2 Perspectivas Futuras

Atualmente ainda fazemos os deslocamentos da amostra e do braço móvel do goniômetro manualmente. Isto torna o processo de medição bastante lento e sujeito a erros humanos de posicionamento. A próxima providência que deveremos tomar para melhorar o sistema será construir uma nova montagem na qual estes movimentos sejam realizados por motores de passo, o que esperamos agilizará muito as medições e melhorará o posicionamento.

Um trabalho de estatística poderia também contribuir na agilização das medições. Através de um estudo cuidadoso, poderíamos estabelecer um número mínimo de pontos experimentais, dentro de determinadas faixas de valores da correlação, necessários à obtenção de um resultado preciso.

Existe um trabalho sendo realizado para aperfeiçoar o programa de registro das imagens e cálculo de correlações. Tal como está ele limita-se a comparar as imagens exatamente

como são capturadas pela câmara CCD. Considerando que sempre poderão haver pequenos erros de posicionamento, eventualmente imperceptíveis ao olho, como parte de um plano de pesquisa está sendo elaborado um programa que calcula as correlações entre duas imagens com pequenos deslocamentos de uma em relação à outra, procurando a situação de máxima correlação, que corresponde à melhor sobreposição possível entre elas, para então realizar o cálculo definitivo de correlação. Pretende-se incluir neste programa a aquisição das imagens a geração dos gráficos com o ajuste de curvas teóricas aos dados experimentais.

Outra alteração que cogitamos é a utilização de *laser* infravermelho ao invés do visível. Como as câmaras CCD respondem bem nesta região, poderíamos equipar a do experimento com um filtro que transmitisse tal radiação e barrasse a luz visível, o que permitiria a utilização do método sem restrições à iluminação do ambiente.

Em nossos experimentos de medição de superfícies atacadas por corrosão e de chapas de aço laminadas a frio encontramos alguns conjuntos de resultados experimentais que divergiam consideravelmente das curvas teóricas, especialmente para maiores inclinações das amostras. Trata-se de casos nos quais sabidamente as superfícies medidas afastam-se da hipótese de distribuição gaussiana das alturas. Acreditamos que o desenvolvimento de modelos mais elaborados e uma abordagem incluindo estatística de ordem mais elevada poderão explicar os desvios e até fornecer, baseado neles, maiores informações sobre as superfícies. Em particular, caso se desenvolvesse uma teoria para a aplicação da CAS a superfícies com estrias, como as marcas de ferramentas formadas nos processos de usinagem de peças em máquinas operatrizes (tornos, fresadoras etc.) sua utilidade seria enormemente ampliada.

Mais uma sugestão para desenvolvimento de teoria é o estudo da influência de geometrias não planas das superfícies sobre os resultados da CAS. Quando a região iluminada é pequena e a curvatura da superfície não é muito acentuada, a utilização da teoria desenvolvida sobre a premissa de uma superfície espalhadora plana pode não acarretar grandes erros. Quando estas condições não forem atendidas, no entanto, imaginamos a necessidade de tê-las em conta para a obtenção de resultados corretos.



Quanto às aplicações, temos trabalhado em colaboração com vários pesquisadores da área de odontologia, que precisam freqüentemente de avaliações de rugosidade de dentes ou materiais de restauração, mas enfrentam problemas para obtê-las através de medições convencionais (com perfilômetros de agulha). Já foi aventada a possibilidade de utilização da CAS para caracterização de textura de folhas, um problema ainda não completamente resolvido para as pesquisas na área de botânica. Temos conhecimento de outra aplicação, desenvolvida no exterior, semelhante à última mencionada, qual seja o controle de papéis, de interesse para a indústria de celulose. Enfim, pode-se imaginar a utilização da CAS numa série de situações em que os métodos já estabelecidos de caracterização de superfícies apresentem dificuldades.

# Bibliografia

- [1] WHITEHOUSE, David J. **Handbook of Surface Metrology**. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing Ltd., 1994. 988p.
- [2] INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 4287: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters**. Geneva, Switzerland, 1997. 28p.
- [3] INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11562: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Metrological characteristics of phase correct filters**. Geneva, Switzerland, 1996. 8p.
- [4] SILVA, Felix Claret da. **Aplicação do *Speckle* Dinâmico para o Estudo do Processo de Secagem de Pinturas**. 2000. 67 p. Dissertação de mestrado - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [5] REBOLLO, María Aurora. **Estudio de Superficies Rugosas, Mediante el Analisis del Valor Medio de la Intensidad Dispersada y la Correlacion de Speckles**. 1995. 131p. Tesis de Doctorado - Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física, La Plata, Argentina.
- [6] BENNETT, Jean M.; MATTSON, Lars. **Introduction to Surface Roughness and Scattering**. 2nd ed. Washington, D. C., USA: Optical Society of America, 1989. 110p.
- [7] SALDANHA, Adriana. **Rugosidade: Conceituação e Medição**. 1997. 66p. Seminário apresentado na disciplina PMC-873 Introdução ao Desgaste - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [8] SOGA, Diogo. **Medida de Topografia de Superfície Usando a Técnica de Deslocamento de Fase**. 2000. 60 p. Dissertação de mestrado - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [9] SOUZA Filho, José Cândido. **Obtenção da Rugosidade Rms de Superfícies Recobertas com Ouro e Alumínio Utilizando a Técnica de Espalhamento de Luz Laser HeNe**. 1997. 139p. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.



- [10] HECHT, Eugene. **Optics**. 3rd ed. Reading, MA, USA: Addison-Wesley Longman, Inc., 1998. 694p.
- [11] ENNOS, Anthony Edward. Speckle Interferometry. In: DAINTY, John Christopher (Ed.). **Laser Speckle and Related Phenomena**. 2nd ed. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1984. Cap. 6, p. 207. (Topics in Applied Physics, vol. 9).
- [12] MELÃO, Iza. **Técnica do Granulado Óptico ("Speckle") na Medida de Micro-Deslocamento**. 1991. 99p. Dissertação de mestrado - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [13] ROCCATTO, Flávio José; MURAMATSU, Mikiya. Medida de micro-deslocamento usando laser-speckle. In: VI SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP - EXATAS E ENGENHARIA / XVI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 1998, São Carlos.
- [14] MURAMATSU, Mikiya. **Técnicas Ópticas para Análise de Superfície**. 2001. 157p. Tese de Livre-Docência - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [15] GOODMAN, Joseph Wilfred. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In: DAINTY, John Christopher (Ed.). **Laser Speckle and Related Phenomena**. 2nd ed. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1984. Cap. 2. (Topics in Applied Physics, vol. 9).
- [16] VANIN, Vito Roberto; GOUFFON, Phillip; HELENE, Otaviano Augusto. **Tópicos Avançados em Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental** - Notas de aula. Segunda edição. São Paulo: Laboratório do Acelerador Linear - Instituto de Física - Universidade de São Paulo, 1998.
- [17] REBOLLO, María Aurora *et al.*. Medición de la Rugosidad de Superficies por Medio de la Correlación Digital de *Speckles*. In: REUNIÓN DE LA ASOCIACIÓN FÍSICA ARGENTINA, 76a., 1991, Tucuman, Argentina. **Anales...** Tandil, 1991. p. 181-184.
- [18] BECKMANN, Petr; SPIZZICHINO, André. **The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces**. London: Pergamon Press, 1963. 503 p.
- [19] LÉGER, D. **Deux Methodes de Mesure de Rugosités par correlation de Speckles**. 1976. Tese de Doutorado - Université de Paris-SUD, Paris, França.
- [20] LÉGER, D.; MATHIEU E.; PERRIN J. C. Optical Surface Roughness Determination Using Speckle Correlation Technique. **Applied Optics**, vol. 14, no. 4, p. 872-877, April 1975.

- [21] GOODMAN, Joseph Wilfred. **Introduction to Fourier Optics**. Second ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1996. 441 p. (Electrical Engineering Series).
- [22] HOUCHENS, A. F.; HERRING, R. G. Bidirectional Reflectance of Rough Metal Surfaces. **Prog. Astronaut. Aeronaut.**, vol. 20, p. 65-69, 1967.
- [23] HENSLER, D. H. Light Scattering from Fused Polycrystalline Aluminum Oxide Surfaces. **Applied Optics**, vol. 11, p. 2522-2528, 1972.
- [24] BLANE, Kleiton; MURAMATSU, Mikiya; SILVA, Felix Claret da. Verificação da Linearidade de Resposta da Câmera *CCD*. In: ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA, XXI ENFMC, junho de 1998, Caxambu-MG, Brasil. **Anais de Óptica do...** editado por Lucila Cescato. Campinas: Instituto de Física "Gleb Wataghin"/Gráfica da Universidade Estadual de Campinas, 1998. p. 352-356.
- [25] PAIVA Jr., Raul Dias et al. Study of the electro-erosion process by the analysis of speckle correlation. **Insight**, Northampton, England, Vol. 43, No 4, p. 235-240, April 2001.
- [26] ALVES, Claudia Maria Coêlho. **Estudo "In Vitro" da Rugosidade Superficial de Três Ligas de Amálgama Através do Método de Correlação Angular de "Speckle"**. 2001. 74 p. Tese de doutorado - Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.